

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

П.М. Пушков, В.П. Андрейченко, А.В. Кульбашный

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим и самостоятельным занятиям

по тяговым расчетам по дисциплине

«Основы электрической тяги»

(для студентов 3 курса дневной, 4 курса заочной форм обучения
специальности 7.092202 – «Электрический транспорт»)

Харьков – ХНАМГ - 2008

Методические указания к практическим и самостоятельным занятиям по тяговым расчетам по дисциплине «Основы электрической тяги» (для студентов 3 курса дневной, 4 курса заочной форм обучения специальности 7.092202 – «Электрический транспорт»)/ Сост.: Пушков П.М., Андрейченко В.П., Кульбашный А.В. – Харьков, ХНАГХ, 2008 - 86 с.

Составители: П.М. Пушков,
 В.П. Андрейченко,
 А.В. Кульбашный

Рецензент: доц. В.К. Нем

Утверждено кафедрой
электрического транспорта
протокол № 10 от 26.02.08

ВВЕДЕНИЕ

Учебной программой дисциплины «Основы электрической тяги» предусмотрено проведение со студентами практических и самостоятельных занятий. Настоящие методические указания написаны с целью оказания помощи студентам самостоятельно научиться применять теоретические положения основ электрической тяги к решению задач по тяговым расчетам, типовых задач и выполнению контрольных заданий.

Материал методических указаний соответствует тематике курсовой работы и практических занятий по тяговым расчетам и состоит из основных теоретических положений, примеров и задач по каждой теме занятий.

1. СПРЯМЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ УЧАСТКА ПУТИ

Для сокращения отдельных элементов профиля и упрощения тяговых расчетов продольный профиль подвергают обработке (спрямлению), состоящей из двух операций: спрямления профиля и спрямления кривых. Полученный в результате этих операций профиль, имеющий меньшее число элементов и переломов по сравнению с действительным профилем пути, называют спрямленным.

Спрямление профиля пути выполняют в такой последовательности:

1. Из подробного профиля пути (рис.1) выбирают и группируют смежные элементы, подлежащие спрямлению. В спрямляемую группу включают рядом лежащие элементы одного знака. Горизонтальные элементы относят или к спускам, или к подъемам, как удобнее для расчета.

2. Определяют уклоны i'_c , ‰, каждого спрямляемого участка по формуле

$$i'_c = \frac{\sum_{j=1}^m i_j \ell_j}{\sum_{j=1}^m \ell_j}, \quad (1)$$

где i_j и ℓ_j - соответственно уклоны и длины элементов профиля, которые включены в спрямляемый участок из m элементов.

Расчет основан на принципе равенства работ, затрачиваемых на преодоление сопротивления от уклона i'_c и на преодоление сопротивления от уклонов i_j на группе из m объединяемых элементов действительного профиля.

При обработке профиля нельзя включать в спрямляемую группу элементы, имеющие резкие отличия в величине уклонов и длинные элементы. Это обусловлено необходимостью обеспечения равноценности уклонов по работе (учета расхода энергии на подтормаживание на вредных спусках, т.е. на элементах пути, у которых $w_i > w_0$) и максимального приближения кривой движения $V(l)$ на спрямленном участке к такой же кривой движения на действительном профиле (на большом уклоне как во время спуска, так и во время

подъема скорость движения будет меньше, чем на спрямленном участке с малым уклоном).

Поэтому длина $\ell_j, \text{м}$, любого из спрямляемых элементов с уклоном i_j должна удовлетворять эмпирическому неравенству

$$\ell_j \leq 2000 / \Delta i, \quad (2)$$

где $\Delta i = |i_j - i'_c|$ - абсолютная разность уклона проверяемого элемента и фиктивного уклона спрямляемого участка профиля, ‰.

Проверяют обычно все элементы группы. Если при проверке длина элемента профиля не удовлетворяет условию (2), его в одну группу с остальными не объединяют.

3. Кривые, встречающиеся на спрямленных участках, заменяют фиктивными подъемами с уклонами i''_c , ‰, определяемыми из условия равенства работ, затрачиваемых на преодоление сопротивления от кривых и фиктивного подъема, по формуле

$$i''_c = \frac{450}{\ell_c} \sum_{i=1}^n \frac{\ell_{kp.i}}{R_{kp.i}}, \quad (3)$$

где $\ell_c = \sum_{j=1}^m \ell_j$ - длина спрямленного участка, м, состоящего из m элементов профиля;

$\ell_{kp.i}$ и $R_{kp.i}$ - соответственно длина и радиус i -й кривой, м;

n - число кривых на спрямленном участке.

4. Результирующие спрямленные уклоны i_c , ‰, спрямленных участков определяют по формулам:

при движении в сторону подъема

$$i_c = i'_c + i''_c,$$

при движении в сторону спуска

$$i_c = -i'_c + i''_c.$$

Знак i_c'' всегда положительный, а знак i_c' зависит от направления движения: «+» - в сторону подъема, «-» - в сторону спуска.

Пример. Спрямить профиль пути, приведенный на рис.1.

№элемента	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{i, \text{‰}}{\ell, \text{м}}$	$\frac{0}{100}$	$200 \setminus 2$	$400 \setminus 3$	$5 / 300$	$10 / 500$	$6 / 200$	$\frac{0}{300}$	$400 \setminus 10$
$\frac{R_{кр, \text{м}}}{\ell_{кр, \text{м}}}$	$\frac{150}{80}$	$\frac{300}{100}$	—	$\frac{100}{50}$	—	$\frac{150}{50}$	$\frac{200}{100}$	—

Рис.1 – Профиль участка пути, подлежащий спрямлению

1. Выбираем три спрямляемых участка: в 1-й участок входят элементы 1, 2, 3; во 2-й участок входят элементы 4, 5, 6; в 3-й участок входят элементы 7 и 8.

2. Определяем уклоны спрямляемых участков

1	2	3
$700 \setminus 2,3$	$7,7 / 1000$	$700 \setminus 5,7$

$$i'_{c1} = \frac{0 \cdot 100 + 2 \cdot 200 + 3 \cdot 400}{100 + 200 + 400} = 2,3 \text{‰};$$

$$i'_{c2} = \frac{5 \cdot 300 + 10 \cdot 500 + 6 \cdot 200}{300 + 500 + 200} = 7,7 \text{‰};$$

$$i'_{c3} = \frac{0 \cdot 300 + 10 \cdot 400}{300 + 400} = 5,7 \text{‰}.$$

При движении слева направо (в прямом направлении)

$$i'_{c1} = -2,3 \text{‰}; \quad i'_{c2} = +7,7 \text{‰}; \quad i'_{c3} = -5,7 \text{‰}.$$

При движении справа налево (в обратном направлении)

$$i'_{c1} = +2,3 \text{‰}; \quad i'_{c2} = -7,7 \text{‰}; \quad i'_{c3} = +5,7 \text{‰}.$$

3. Проверяем удовлетворение длин элементов реального профиля пути эмпирическому неравенству (2) (движение слева направо).

$$\ell_1 = 100 \leq \frac{2000}{|0 + 2,3|} = 870 ;$$

$$\ell_2 = 200 \leq \frac{2000}{|-2 + 2,3|} = 6660 ;$$

$$\ell_3 = 400 \leq \frac{2000}{|-3 + 2,3|} = 2860 ;$$

$$\ell_4 = 300 \leq \frac{2000}{|5 - 7,7|} = 740 ;$$

$$\ell_5 = 500 \leq \frac{2000}{|10 - 7,7|} = 870 ;$$

$$\ell_6 = 200 \leq \frac{2000}{|6 - 7,7|} = 1175 ;$$

$$\ell_7 = 300 \leq \frac{2000}{|0 + 5,7|} = 350 ;$$

$$\ell_8 = 400 \leq \frac{2000}{|-10 + 5,7|} = 465.$$

Вывод: длины всех элементов профиля участка пути удовлетворяют неравенству (2) и выбранная группировка элементов профиля в спрямляемые участки 1, 2, 3 допустима.

4. Определяем фиктивные подъемы с крутизной i_c'' :

$$i_{c1}'' = \frac{450}{700} \left(\frac{80}{150} + \frac{100}{300} \right) = 0,57 \text{ ‰};$$

$$i_{c2}'' = \frac{450}{1000} \left(\frac{50}{100} + \frac{50}{150} \right) = 0,37 \text{ ‰};$$

$$i_{c3}'' = \frac{450}{700} \left(\frac{100}{200} \right) = 0,32 \text{ ‰}.$$

5. Определяем результирующие уклоны i_c спрямленных участков:

при движении слева направо (в прямом направлении)

$$i_{c1} = -i_{c1}' + i_{c1}'' = -2,3 + 0,57 = -1,73 \text{ ‰};$$

$$i_{c2} = i_{c2}' + i_{c2}'' = 7,7 + 0,37 = 8,07 \text{ ‰};$$

$$i_3 = -i_{c3}' + i_{c3}'' = -5,7 + 0,32 = -5,38 \text{ ‰};$$

(желательно округлить с точностью до десятых долей).

при движении справа налево (в обратном направлении)

$$i_{c1} = i_{c1}' + i_{c1}'' = 2,3 + 0,57 = 2,87 \text{ ‰};$$

$$i_{c2} = -i_{c2}' + i_{c2}'' = -7,7 + 0,37 = -7,33 \text{ ‰};$$

$$i_3 = i_{c3}' + i_{c3}'' = 5,7 + 0,32 = 6,02 \text{ ‰};$$

(желательно округлить с точностью до десятых долей).

Спрямленный профиль пути приведен на рис. 2.

направление движения	слева направо (прямое)		
№ спрямленного участка	1	2	3
$\frac{i_{с, \text{‰}}}{\ell_{с, \text{м}}}$	700 \ 1,73	8,07 / 1000	700 \ 5,38
направление движения	справа налево (обратное)		
№ спрямленного участка	1	2	3
$\frac{i_{с, \text{‰}}}{\ell_{с, \text{м}}}$	700 \ 2,87	7,33 / 1000	700 \ 6,02

Рис.2 – Спрямленный профиль пути при движении в прямом и обратном направлениях

2. РАСЧЕТ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ПО РАСХОДУ ЭНЕРГИИ УКЛОНА УЧАСТКА ПУТИ

Эквивалентным по расходу энергии уклоном называют такой неизменный вдоль всего перегона (участка) уклон, на преодоление которого затрачивается энергия, равная сумме затрат энергии на преодоление уклонов (изменение потенциальной энергии ЭПС) и кривых и потерь энергии в тормозах при подтормаживании на вредных спусках при движении по реальному профилю перегона:

$$i_{\text{э}} = i_{\text{ср}} + \frac{\sum (i_{\text{с}} - w_{\text{о.ср}}) l_{\text{с}} + \sum w_{\text{кр}} l_{\text{кр}}}{l_{\text{пер}}}, \quad (4)$$

или

$$i_{\text{э}} = \frac{1}{\ell_{\text{пер}}} (\sum i_{\text{нд}} \ell_{\text{нд}} + \sum w_{\text{кр}} \ell_{\text{кр}} - \sum i_{\text{б}} \ell_{\text{б}} - w_{\text{о.ср}} \sum \ell_{\text{с}}), \quad (5)$$

где $i_{\text{ср}}$ - средний уклон реального профиля перегона, определяемый по выражению:

$$i_{\text{ср}} = \frac{1}{\ell_{\text{пер}}} (\sum i_{\text{нд}} \ell_{\text{нд}} - \sum i_{\text{б}} \ell_{\text{б}} - \sum i_{\text{Б}} \ell_{\text{Б}}) = \frac{1000 (h_{\text{к}} - h_{\text{н}})}{\ell_{\text{пер}}}. \quad (6)$$

Здесь $i_{нд}$ и $\ell_{нд}$, $i_{б}$ и $\ell_{б}$, i_B и ℓ_B - соответственно уклоны и длины подъемов, безвредных и вредных спусков; h_k и h_n - высоты конечного и начального пунктов перегона (участка), м.

Из формулы (4) следует, что значение $i_{э}$ всегда больше значения $i_{ср}$, определяющего изменение потенциальной энергии ЭПС, на величину, соответствующую потерям энергии в тормозах при подтормаживаниях на вредных спусках и в кривых на преодоление дополнительного сопротивления $W_{кр}$.

Среднее по всему перегону значение удельного основного сопротивления движению $W_{о.ср}$, Н/кН, определяют по кривым $w_{ох}(V)$ для езды без тока (на выбеге) при скорости V , на 10...15% превышающей среднюю (ходовую) скорость движения ЭПС по перегону: $V_x = \ell_{пер} / t_x$.

Спуски называют вредными, на которых $|w_i| > (w_0)_{\max}$, где $(w_0)_{\max}$ - удельное основное сопротивление движению при максимально допустимой на данном спуске скорости V_{\max} . Так как на таких спусках $(w_0)_{\max} - |w_i| < 0$, то при выключенных двигателях движение поезда будет ускоряться и если его не подтормаживать, поезд может достичь скорости, не допустимой по условиям безопасности движения. Поэтому приходится применять торможение, что вызывает дополнительные потери энергии в тормозах.

Данное определение вредного спуска справедливо лишь для спусков такой протяженности, на которых поезд успевает разогнаться до предельно допустимой скорости. Безвредными называют спуски, для которых $|w_i| \leq (w_0)_{\max}$. На таких спусках при выключенных двигателях поезд будет замедлять свое движение или двигаться с равномерной скоростью, меньшей по значению максимально допустимой на данном спуске скорости. На рис.3 показаны кривые зависимостей $w_{ох}(V)$ для трамвая (кривая 1) и троллейбуса (кривая 2), для построения которых использованы соответственно выражения: $w_{ох} = 9 + 0,005 \cdot V^2$ и $w_{ох} = 16 + 0,004 \cdot V^2$. Расчетные данные для построения кривых $W_{ох}(V)$ приведены в табл.1.

Таблица 1 – расчетные данные для построения кривых $w_{ox}(V)$

V, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70
т р а м в а й								
w_{ox} , Н/кН	9	9,5	11	13,5	17	21,5	27	33,5
т р о л л е й б у с								
w_{ox} , Н/кН	16	16,4	17,6	19,6	22,4	26	30,4	35,6

Зависимости предельно допустимой скорости движения на спусках $V_{max}(i)$ представлены для трамвая и троллейбуса соответственно линиями 3 и 4. Эти зависимости построены по данным ограничения скорости на спусках, определенным ПТЭ и приведенным в табл.2. При выполнении тяговых расчетов зависимости $V_{max}(i)$ рассчитывают исходя из заданного расчетного тормозного пути ℓ_{mp} и заданной характеристики удельной тормозной силы поезда $\phi(V)$.

На рис.3 кривые $w_{ox}(V)$ пересекают линии $V_{max}(i)$ в точках d и e, абсциссы которых определяют наибольшие спуски i_d для трамвая и i_e для троллейбуса, допускающие движение по ним без подтормаживания при максимальных допустимых скоростях V_{maxd} и V_{maxe} . Спуски с крутизной $i > i_d$ для трамвая и $i > i_e$ для троллейбуса следует считать вредными. В общем можно считать вредными спуски, крутизна которых превышает для трамвая 10‰, а для троллейбуса 20‰.

Таблица 2 – Ограничения скорости в кривых и на спусках

Трамвай				
$V_{max}, км/ч$	30	25	20	15
$i, ‰$	-	$30 \leq i \leq 50$	$50 < i \leq 70$	$70 < i \leq 90$
$R_{kp}, м$	$R_{kp} > 100$	$75 < R_{kp} \leq 100$	$50 < R_{kp} \leq 75$	$R_{kp} \leq 50$
Троллейбус				
$V_{max}, км/ч$	40	35	30	-
$i, ‰$	$40 \leq i \leq 50$	$50 < i \leq 70$	$70 < i \leq 90$	-

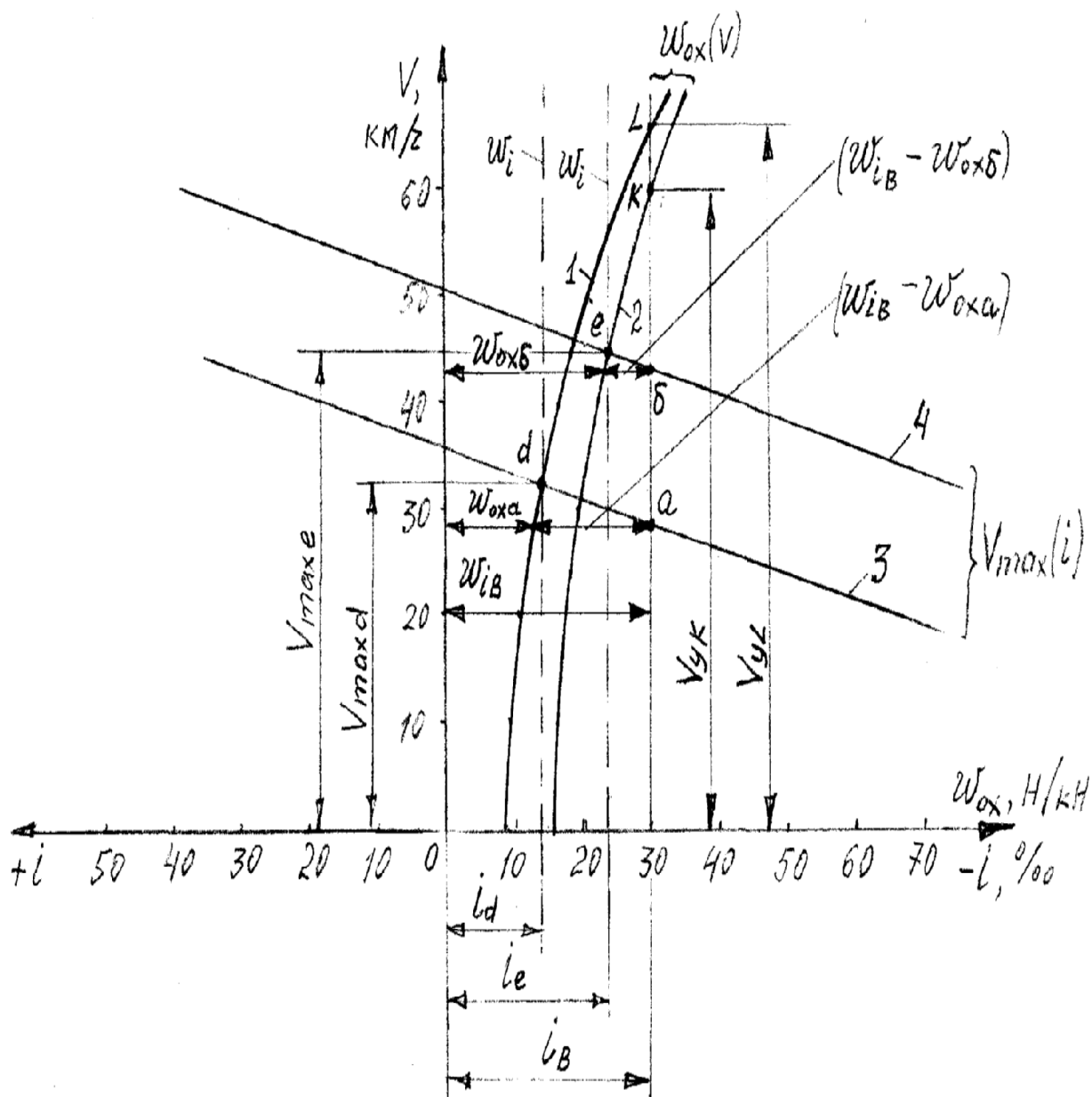


Рис.3 – Характеристики зависимостей $w_{ox}(V)$ и $V_{max}(i)$ соответственно для трамвая (1 и 3) и троллейбуса (2 и 4)

На рис.3 показано, что на спуске с крутизной $i_B = 30\text{‰}$ трамвай и троллейбус на выбеге без подтормаживания разогнались бы соответственно до установившихся скоростей V_{yL} и V_{yK} , существенно превышающих допустимые значения V_{maxa} и V_{maxb} , определяемые ординатами точек a и b пересечения вертикали $i_B = 30\text{‰}$ и линий $V_{max}(i)$ для трамвая и троллейбуса. Для поддержания допустимых скоростей движения на данном спуске трамвай и троллейбус при-

дется подтормаживать и в тормозах будет теряться удельная энергия $(w_{iB} - w_{оха})\ell_B$ в трамвае и $(w_{iB} - w_{оxб})\ell_B$ в троллейбусе, где $w_{iB} - w_{оx}$ - удельная ускоряющая сила, ℓ_B - длина вредного спуска. При тяговых расчетах используют среднее по всему перегону значение удельного основного сопротивления движению $w_{оxcp}$, рассчитываемого для определенного типа ЭПС.

Пример. Определить величину эквивалентного уклона для действительного профиля участка пути длиной $\ell_{пер} = 475 м$.

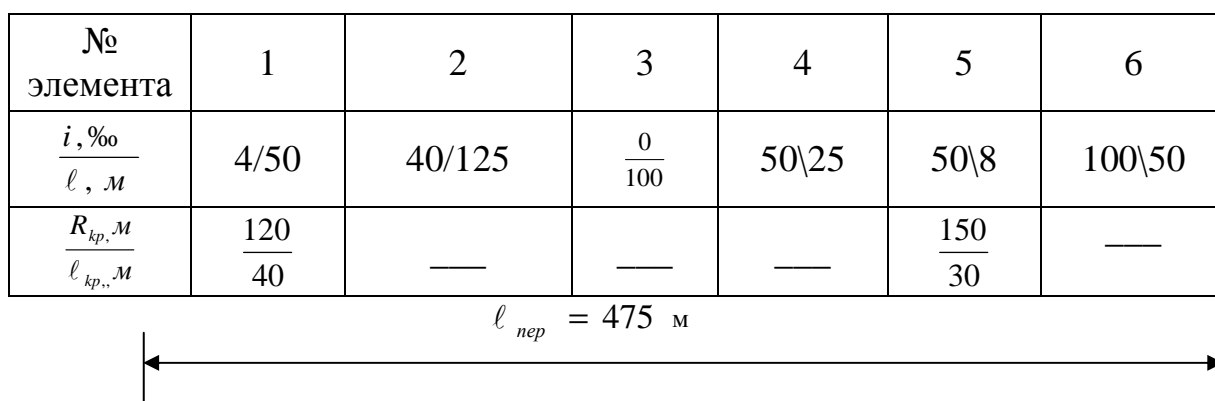


Рис. 4 – Действительный профиль участка пути, для которого следует определить $i_{э}$ при движении по нему трамвая и троллейбуса в прямом и обратном направлениях

При движении трамвая и троллейбуса по заданному участку пути слева направо имеем: подъемы (элементы 1 и 2), горизонталь (элемент 3), безвредный спуск (элемент 5), вредные спуски (элементы 4 и 6), кривые элементы 1 и 5.

Определим удельное сопротивление движению трамвая в кривых элементах:

$$w_{кр.1} = 450 / R_{кр.1} = 450 / 120 = 3,75 H / \kappa H;$$

$$w_{кр.5} = 450 / R_{кр.5} = 450 / 150 = 3,0 H / \kappa H.$$

Находим среднее по всему участку пути значение удельного основного сопротивления, приняв $V_x = 25 км / ч$:

для трамвая $w_{о.ср} = 9 + 0,005(1,1V_x)^2 = 9 + 0,005(1,1 \cdot 25)^2 = 12,78 H / \kappa H;$

для троллейбуса $w_{о.ср} = 16 + 0,004(1,1V_x)^2 = 16 + 0,004(1,1 \cdot 25)^2 = 19,025 H / \kappa H.$

Эквивалентный уклон (ф-ла 5) для трамвая:

$$i_{\Sigma} = \frac{1}{\ell_{\text{пер}}} (\sum i_{\text{нд}} \ell_{\text{нд}} + \sum w_{\text{кр}} \ell_{\text{кр}} - \sum i_{\text{б}} \ell_{\text{б}} - w_{\text{о.ср}} \sum \ell_{\text{Б}}) =$$

$$\frac{1}{475} [(4 \cdot 50 + 40 \cdot 125) + (3,75 \cdot 40 + 3 \cdot 30) - 8 \cdot 50 - 12,78(50 + 100)] =$$

$$= \frac{1}{475} (5200 + 240 - 400 - 1917) = 6,57 \text{ ‰}.$$

Для троллейбуса дополнительное сопротивление движению в кривых можно не учитывать, поэтому для него эквивалентный уклон определяется по выражению:

$$i_{\Sigma} = \frac{1}{\ell_{\text{пер}}} (\sum i_{\text{нд}} \ell_{\text{нд}} - \sum i_{\text{б}} \ell_{\text{б}} - w_{\text{о.ср}} \sum \ell_{\text{Б}}) =$$

$$\frac{1}{475} [(4 \cdot 50 + 40 \cdot 125) - 8 \cdot 50 - 19,025(50 + 100)] =$$

$$\frac{1}{475} [5200 - 400 - 2854] = 4,1 \text{ ‰}.$$

При движении трамвая и троллейбуса по заданному участку пути справа налево имеем: подъемы (элементы 4, 5, 6), горизонталь (элемент 3), безвредный спуск (элемент 1), вредный спуск (элемент 2), кривые элементы 1 и 5.

Эквивалентный уклон для трамвая

$$i_{\Sigma} = \frac{1}{475} [(50 \cdot 100 + 8 \cdot 50 + 25 \cdot 50) + (3,75 \cdot 40 + 3 \cdot 30) - 4 \cdot 50 - 12,78 \cdot 125] =$$

$$= \frac{1}{475} [6650 + 240 - 200 - 1598] = 10,72 \text{ ‰}.$$

Эквивалентный уклон для троллейбуса

$$i_{\Sigma} = \frac{1}{475} [(50 \cdot 100 + 8 \cdot 50 + 25 \cdot 50) - 4 \cdot 50 - 19,025 \cdot 125] =$$

$$= \frac{1}{475} [6650 - 200 - 2378] = 8,57 \text{ ‰}.$$

Для обоих направлений движения по участку пути (перегону) значение эквивалентного уклона находят как среднее арифметическое из двух направлений:

$$\text{для трамвая} \quad i_{\Sigma} = \frac{i_{\Sigma \text{пр}} + i_{\Sigma \text{обр}}}{2} = \frac{6,57 + 10,72}{2} = 8,645 \text{ ‰};$$

для троллейбуса $i_{\Sigma} = \frac{i_{\text{э.пр}} + i_{\text{э.обр}}}{2} = \frac{4,1 + 8,57}{2} = 6,335\text{‰}$.

Вывод: значения эквивалентных уклонов для трамвая больше, чем у троллейбуса, так как среднее основное удельное сопротивление у трамвая меньше, чем у троллейбуса, и на вредных спусках в тормозах трамвая будет теряться больше энергии, чем в тормозах троллейбуса, кроме этого у трамвая имеют место дополнительные потери энергии при прохождении кривых элементов пути.

3. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЕЗДА

Тяговой называют характеристику, устанавливающую зависимость силы тяги двигателя F_k или поезда F от скорости V , т.е. $F_k(V)$ или $F(V)$ при постоянном напряжении $U = \text{const}$ и неизменных схемах электрических цепей двигателей и сопротивлениях их элементов. При числе z_M тяговых двигателей в поезде и силе тяги F_k каждого имеем

$$F = z_M F_k . \quad (7)$$

Силу тяги F , а следовательно ускорение и скорость поезда регулируют с помощью переключений в цепях для изменения напряжения на тяговых двигателях и воздействия на их возбуждение.

Для построения тяговой характеристики необходимо иметь электромеханические характеристики двигателей, отнесенные к ободу движущих колес, $V(I)$ и $F_k(I)$ при полном и ослабленном поле. Рабочая часть тяговой характеристики ограничена условиями сцепления движущих колес с рельсами или дорогой, надежной работой двигателей по коммутации и механической прочностью. При малых скоростях наибольшая сила тяги F_{\max} определяется либо максимально допустимым током I_{\max} (ограничение по условию устойчивой коммутации), либо условиями сцепления в зависимости от того, какое из этих условий дает меньшее значение силы тяги. Ограничение по сцеплению показано на рис. 5 линией 2, а по току I_{\max} - линией 1.

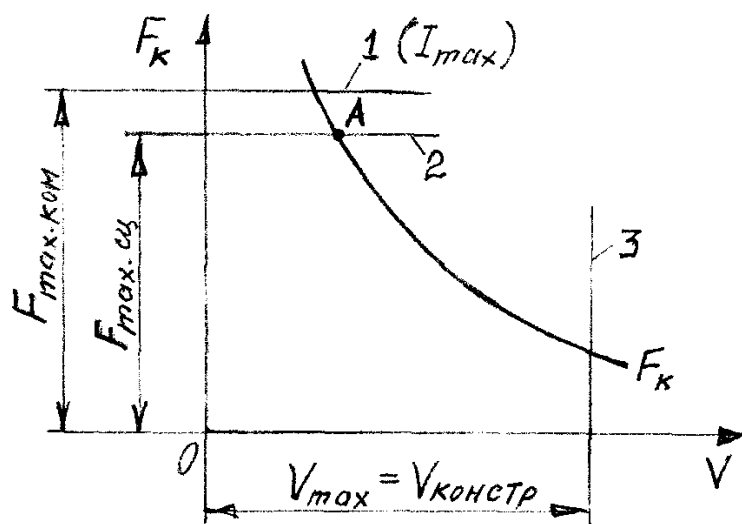


Рис. 5 – Ограничения тяговой характеристики двигателя

В соответствии с ГОСТ 2582-81 «Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия» тяговые двигатели должны быть рассчитаны на наибольший допускаемый ток, равный двойному часовому току ($I_{\max} = 2I_{\text{ч}}$), если в технической документации, утвержденной в установленном порядке, не установлена другая кратность наибольшего допускаемого тока. Для рельсового транспорта F_{\max} определяется ограничением по сцеплению (рис.5, точка А), а для безрельсового – ограничением по коммутации, т.е. наибольшим допускаемым током I_{\max} (так как в этом случае $F_{\max.\text{ком}} < F_{\max.\text{сц}}$). Точка А тяговой характеристики определяет максимальную мощность, развиваемую тяговым двигателем. Линия 3 соответствует ограничению по максимально допустимой скорости V_{\max} , равной конструкционной скорости $V_{\text{констр}}$ данного типа подвижного состава.

Пуск поезда желательно осуществлять с наибольшим допускаемым пусковым током $I_{\text{н.макс}}$. В этом случае увеличивается пусковая сила тяги и пусковое ускорение, повышается средняя скорость движения ПС на перегоне и уменьшаются потери в пусковых реостатах. Желательно поддерживать пусковой ток неизменным до выхода на характеристику $V(I)$ с максимальным ослаблением поля. При этом до выхода на характеристику $V(I)$, соответствующую полному возбуждению двигателей, остаются практически неизменными пусковая сила тяги $F_{\text{н}}$ и пусковое ускорение $a_{\text{н}}$ и скорость движения возрастает во времени по линейному закону $V = a_{\text{н}} t$.

Выбор пусковых параметров можно осуществить, исходя из заданного значения среднего пускового ускорения a_n , а следовательно из средней пусковой силы тяги поезда $F_n = m_{np} a_n + W_{o.c.p.}$, и дальнейшей их проверкой по условиям сцепления и максимально допускаемого тока I_{max} или исходя из максимальной пусковой силы тяги, определяемой по условиям сцепления, $F_{n.max} = 1000\psi G_{сц.пор}$, где $G_{сц.пор}$ - сцепной вес пустого ПС, и дальнейшей проверкой выполнения ограничений $I_{n.max} \leq 2 I_{\psi}$, $a_{n.max} \leq a_{n.don} = 1,5..1,8 м/с^2$.

Пример. Рассчитать и построить тяговую характеристику трамвайного моторного вагона типа КТМ-5М с собственным весом (весом тары) $G_c = 185 кН$ и тяговыми двигателями смешанного возбуждения типа ДК-259Г-3.

Основные технические данные тягового двигателя ДК-259Г-3: напряжение, на которое выполнена изоляция, $U_c = 550 В$; напряжение на коллекторе (зажимах двигателя) $U_d = 275 В$; мощность на валу (полезная мощность) $P_{\psi} = 45 кВт$; частота вращения $n_{\psi} / n_{max} = 1220/4100$ об/мин; ток часового режима $I_{\psi} = 190 А$.

Электромеханические характеристики двигателя заданы в виде табл. 3.

Таблица 3 – Характеристики двигателя ДК-259Г-3, отнесенные к ободу колеса, при $U_d = 275 В$, $D_K = 700 мм$, $\mu = 7,17$

I, А	$\alpha = 100\%$, $I_{III} = 2 A$		$\alpha = 50\%$, $I_{III} = 0$	
	V, км/ч	F _K , Н	V, км/ч	F _K , Н
0	48	-	-	-
50	27	1666	-	98
75	23	2940	67	880
100	21	3920	52,5	1770
150	19	6760	37	3430
200	17	9610	30	5684
250	15	12940	26	7840
300	14	16470	23	10290

На рис. 6 представлены характеристики $V(I)$, и $F_K(I)$ двигателя при полном и ослабленном поле, построенные по данным табл. 3. Как правило, в условиях

эксплуатации используются характеристики с максимальным ослаблением поля. Поэтому тяговую характеристику вагона следует строить по верхней скоростной характеристике $V_{on}(I)$ и по нижней характеристике силы тяги $F_{к.он}(I)$.

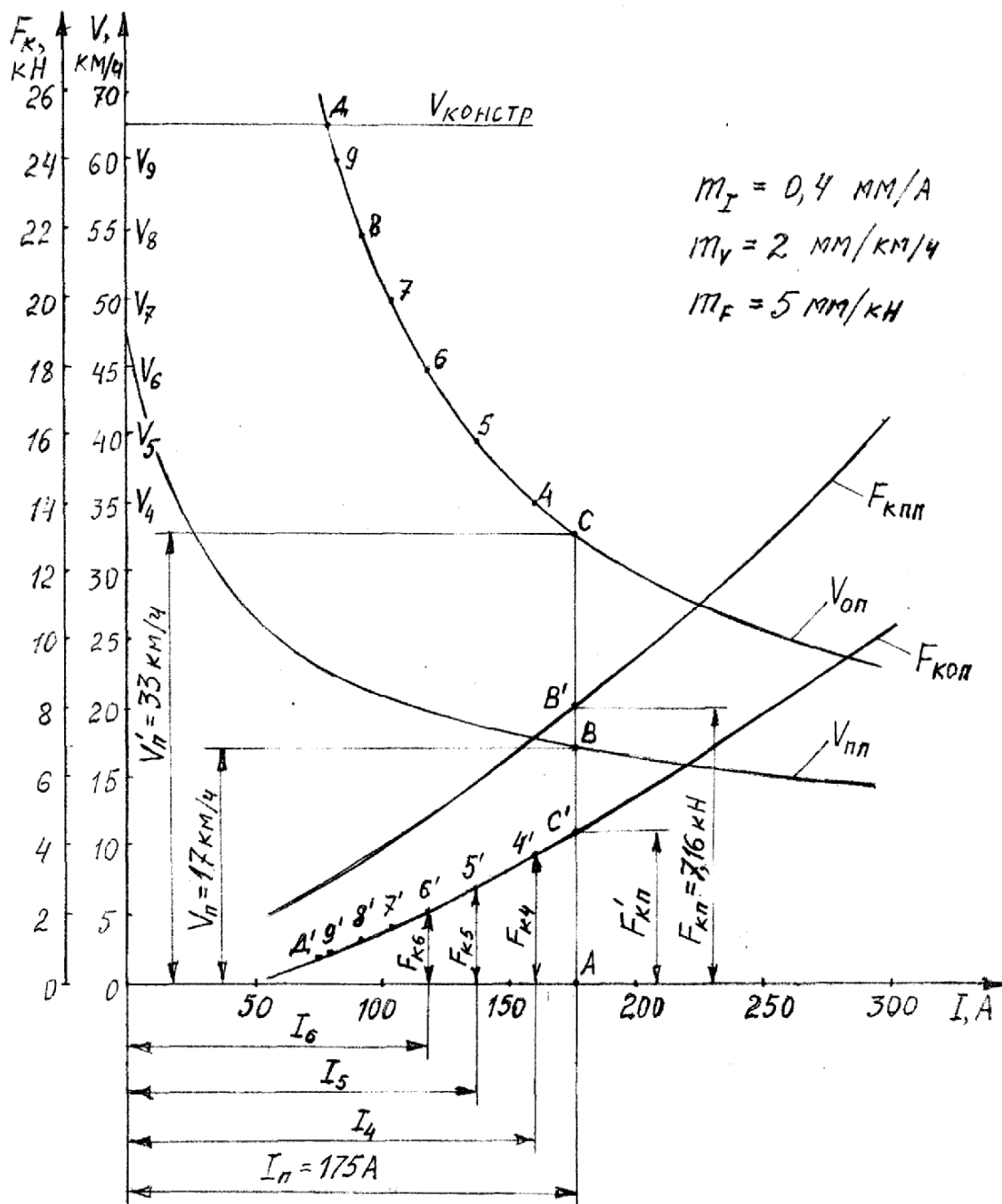


Рис.6 – Характеристики $V(I)$, $F_k(I)$ тягового двигателя ДК-259Г-3 при

$U_d = 275 \text{ В}$, $D_k = 0,7 \text{ м}$, $\mu = 7,17 \text{ с}$ нанесением режима пуска

Тяговая характеристика строится, начиная с момента трогания с места вагона ($V=0$), до скорости $V_{\max} = V_{\text{констр}}$. Для построения части тяговой характеристики вагона при движении на реостатных позициях (период пуска) надо определить значение средней пусковой силы тяги вагона F_n , которое поддерживается постоянным до скорости V_n выхода на автоматическую характеристику $V_{nn}(I)$ при полном поле (т. В на рис.6). На позициях ослабленного поля, как правило, поддерживается примерно такой же средний пусковой ток двигателей I_n , как и при пуске с включенными пусковыми реостатами, а сила тяги двигателей при этом уменьшается от значения F_{kn} (т. В' на характеристике $F_{knn}(I)$) до значения F'_{kn} (т. С' на характеристике $F_{kon}(I)$).

Зададимся значениями среднего пускового ускорения вагона $a_n = 1,2 \text{ м/с}^2$ и весом вагона с пассажирами $G = 200 \text{ кН}$. Коэффициент инерции вращающихся частей вагона примем равным $\kappa_u = (1 + \gamma) = 1,12$.

На горизонтальном и прямолинейном участке пути действует только сила основного сопротивления движению вагона, которую определяем как среднее значение за период пуска под реостатами для средней скорости $V_{cp} = 15 \text{ км/ч}$:

$$W_{ocp} = Gw_{ocp} = G(5 + 0,005 \cdot V_{cp}^2) = 200(5 + 0,005 \cdot 15^2) = 1225 \text{ Н}.$$

Средняя пусковая сила тяги вагона

$$F_n = m(1 + \gamma)a_n + W_{ocp} = 102 G(1 + \gamma)a_n + W_{ocp} = 102 \cdot 200 \cdot 1,12 \cdot 1,2 + 1225 = 28640 \text{ Н} = 28,64 \text{ кН}.$$

Средняя пусковая сила тяги одного двигателя

$$F_{kn} = F_n / z_m = 28,64 / 4 = 7,16 \text{ кН}.$$

По характеристике $F_{knn}(I)$ находим средний пусковой ток двигателя $I_n = 175 \text{ А}$.

Проверяем пусковую силу тяги по условиям сцепления и по допускаемому максимальному току двигателя I_{\max} . Максимальная пусковая сила тяги вагона

$F_{n \max}$ не должна превышать максимальную силу сцепления

$$F_{n \max} = F_n (1 + \kappa_F) \leq 10^3 G_{\text{сц}} \psi. \quad (8)$$

Здесь κ_F - коэффициент неравномерности пуска по силе тяги. Для автоматической многоступенчатой системы реостатного пуска можно принять $\kappa_F = 0,1$. $G_{\text{сц}}$ - сцепной вес вагона, равный у моторного трамвайного вагона его полному весу, т.е. $G_{\text{сц}} = 200 \text{ кН}$. Расчетный коэффициент сцепления вагона ψ примем равным 0,16. После подстановки в выражение (8) принятых значений κ_F , $G_{\text{сц}}$ и ψ , получаем

$$F_{n \max} = 28640 \cdot 1,1 = 31500 < 10^3 \cdot 200 \cdot 0,16 = 32000, \text{ Н.}$$

Ограничение максимальной пусковой силы тяги по сцеплению колес вагона с рельсами выполняется. Для проверки пусковой силы тяги по максимальному току двигателей определяем максимальную пусковую силу тяги одного двигателя

$$F_{\text{кп max}} = F_{n \max} / 4 = 31500 / 4 = 7875 \text{ Н.}$$

По характеристике $F_{\text{кпп}}(I)$ (см. рис.6) находим $I_{\text{п max}} = 180 \text{ А}$, т.е. меньше максимального допускаемого тока якоря двигателя

$$I_{\max} = 2I_{\text{ч}} = 2 \cdot 190 = 380 \text{ А.}$$

В соответствии с рис.6 после вывода пусковых реостатов вагон разгоняется до пусковой скорости $V_n = 17 \text{ км/ч}$ и при дальнейшем разгоне за счет ослабления поля достигает скорости $V_n' = 33 \text{ км/ч}$ (т. С на характеристике $V_{\text{он}}(I)$). При этом сила тяги двигателя уменьшается до значения $F_{\text{кп}}' = 4,4 \text{ кН}$ (т. С' на характеристике $F_{\text{кон}}(I)$). Далее в диапазоне изменения скорости от V_n' до $V_{\max} = V_{\text{констр}}$ (т. D на характеристике $V_{\text{он}}(I)$) для различных значений тока находим соответствующие значения скорости вагона и силы тяги двигателя и заносим их в графы 1,2,3 табл. 4. Соответствующие значения силы тяги вагона $F = 4F_k$ заносим в графу 4. Удельные значения силы тяги вагона определяем по формуле $f = F/G = F/200$, Н/кН. Результаты вычислений заносим в графу 5. От-

кладывая по оси ординат (рис. 7) значения f , а по оси абсцисс соответствующие им значения V (графа 2), получим точки A(1), B(2), C(3), 4, ..., 9, D. Проведя через них кривую, получаем тяговую характеристику $f(V)$. Для значений скорости, указанных в графе 2 табл.4, по формуле $w_0 = 5 + 0,005 \cdot V^2$ рассчитываем значения удельного основного сопротивления и заносим в графу 6 табл. 4.

Таблица 4 – Данные для построения характеристики удельной силы тяги $f(V)$ и характеристики ускоряющей силы $f_o(V)$

№	I, А	V км/ч	F_K , Н	F, Н	f , Н/кН	w_0 , Н/кН	f_o , Н/кН
	1	2	3	4	5	6	7
A(1)	175	0	7160	28640	143	5	138
B(2)	175	17	7160	28640	143	6,4	136,6
C(3)	175	33	4400	17600	88	10,4	77,6
4	160	35	3800	15200	76	11,1	64,9
5	136	40	2800	11200	56	13	43
6	119	45	2200	8800	44	15,1	28,9
7	104	50	1600	6400	32	17,5	14,5
8	92	55	1200	4800	24	20,1	3,9
9	80	60	900	3600	18	23	-5
D	75	65	700	2800	14	26,1	-12,1

При построении кривых движения используют характеристику удельной ускоряющей силы $f_o(V)$. Величина этой силы равна разности удельной силы тяги вагона f и удельного основного сопротивления W_0 , которое испытывает вагон в режиме тяги на прямом и горизонтальном участке пути. Значения силы f_o заносят в графу 7 табл. 4 и по этим значениям строят кривую $f_o(V)$ на рис. 7. Точка E этой кривой соответствует $f_o = 0$ и $V = V_y$. Установившаяся скорость V_y является наибольшей скоростью, которую может развить вагон в режиме тяги на прямом и горизонтальном участке пути.

$$f_{n \max} = F_{n \max} / G = 29600 / 200 = 148 \text{ Н/кН}, \text{ а затем максимальную}$$

силу тяги одного двигателя:

$$F_{kn \max} = F_{n \max} / z_{\text{м}} = 29600 / 4 = 7400 \text{ Н}.$$

Здесь G_c и G – соответственно сцепной вес пустого вагона и вес вагона с пассажирами.

Согласно характеристике $F_{\text{кпп}}(I)$ (см. рис.6), найденному значению $F_{kn \max}$ соответствует ток $I_{n \max} = 177 \text{ А}$. Следовательно, верхний предел колебаний пускового тока будет равен $I_{n \max} = 177 \text{ А}$. Примем колебания тока $\pm 5\%$ ($K_I = 0,05$). Тогда средний пусковой ток двигателя

$$I_n = I_{n \max} / (1 + K_I) = 177 / (1 + 0,05) = 168,6 \text{ А},$$

а минимальный ток $I_{n \min} = I_n (1 - K_I) = 168,6 \cdot 0,95 = 160,2 \text{ А}$.

Проверим найденное значение тока $I_{n \max}$ при условии $I_{n \max} \leq 2I_{\text{ч}}$: $177 < 2 \cdot 190 = 380$, т.е. допустимо. Согласно характеристике $F_{\text{кпп}}(I)$ (см. рис.6) току $I_n = 168,6 \text{ А}$ соответствует средняя пусковая сила тяги $F_{kn} = 6,95 \text{ кН}$.

Средняя пусковая сила тяги вагона

$$F_n = F_{kn} \cdot z_{\text{м}} = 6,95 \cdot 4 = 27,8 \text{ кН}.$$

Средняя удельная пусковая сила тяги вагона

$$f_n = F_n / G = 27800 / 200 = 139 \text{ Н / кН}.$$

Отложим значение f_n на рис.7 штриховой линией. Проверим найденные значения максимальной и средней силы тяги на условии допускаемого ускорения на прямом горизонтальном участке. Удельное основное сопротивление определим для среднего значения пусковой скорости $v_{cp} = 15 \text{ км/ч}$ по формуле

$$w_{0cp} = 5 + 0,005 \cdot v_{cp}^2 = 5 + 0,005 \cdot 15^2 = 6,125 \text{ Н/кН}.$$

Максимальное пусковое ускорение

$$a_{n \max} = \frac{f_{n \max} - w_{0cp}}{102 \cdot \kappa_u} = \frac{148 - 6,125}{102 \cdot 1,12} = 1,242 \text{ м / с}^2,$$

среднее пусковое ускорение

$$a_n = \frac{f_n - w_{ocp}}{102 \cdot \kappa_u} = \frac{139 - 6,125}{102 \cdot 1,12} = 1,163 \text{ м / с}^2,$$

что для одно вагонного поезда с косвенной автоматической системой управления допустимо. Таким образом, принятые при расчете пределы колебаний тока и его максимальное значение вполне допустимы по условиям сцепления, ускорения и соотношения с часовым током.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ДВИЖЕНИЕ ПОЕЗДА

Расход энергии на движение поезда может быть определен по кривым потребляемого тока либо аналитически путем расчета отдельных составляющих расхода энергии.

Определение расхода энергии по кривым потребляемого тока

Построение кривой $I(t)$ потребляемого одним двигателем тока на основании скоростных характеристик двигателя $V(I)$ при полном и ослабленном поле и кривой движения поезда по перегону $V(t)$ показано на рис.8. При реостатном пуске с постоянным средним пусковым током двигателя I_n потребляемый всеми двигателями поезда ток $I_n = z_n I$, где z_n - число параллельных ветвей схемы соединения двигателей.

Потребление поездом тока рассматривают при постоянном напряжении контактной сети U_k , равном среднему его значению, для которого построены кривые движения поезда.

Построение производится по точкам. Для ряда значений времени $t_1, t_2 \dots$ (рис.8) находят по кривой движения $V(t)$ соответствующие значения скорости $V_1 = V_n, V_2 = V_n', \dots$ за время t_I работы двигателей. При повторном включении двигателей построение кривой $I(t)$ производится аналогично. Для значений скоростей V_1, V_2, \dots по кривой $I(V)$ определяют значения тока

$I_1 = I_n, I_2 = I_n, \dots$, потребляемого двигателем. Найденные значения тока I_1, I_2, \dots в выбранном масштабе m_I , мм/А, откладывают как ординаты точек искомой кривой тока, абсциссы которой равны соответственно t_1, t_2, \dots . Данные для построения кривой тока $I(t)$ представлены в табл. 5. В этой же таблице приведены значения среднего тока двигателя I_{cp} и среднего тока поезда $I_{лср}$, потребляемого за время Δt при $z_n = 2$, а также значения квадрата среднего тока двигателя I_{cp}^2 , которые будут использованы при определении среднеквадратичного тока двигателя и проверке двигателя по нагреванию.

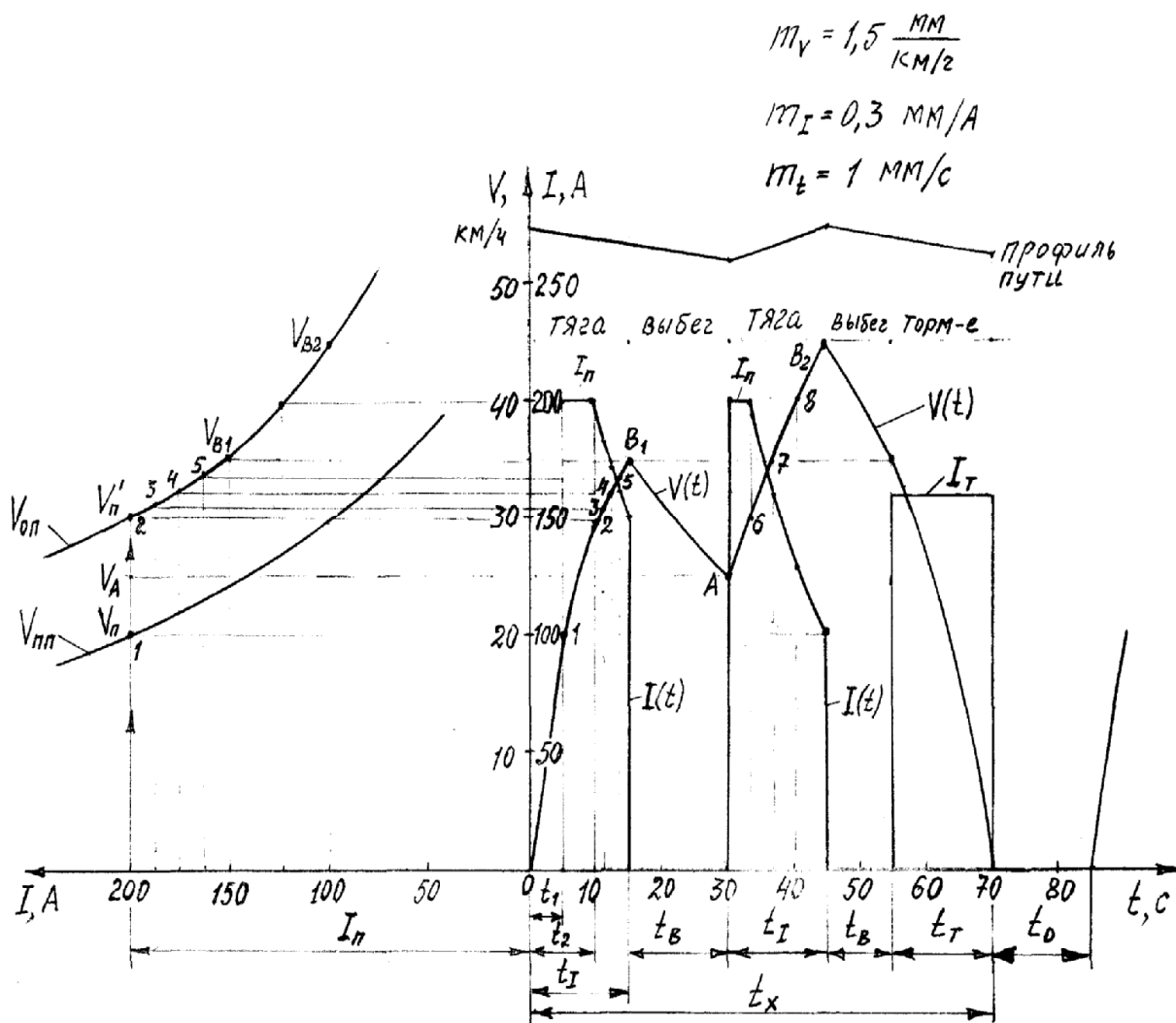


Рис.8 – Построение кривой $I(t)$ потребляемого тяговым двигателем тока

Расход энергии на движение поезда Вт·ч при отсутствии рекуперации энергии определяется по выражению

$$A = U_k (\sum I_{л.ср} \cdot \Delta t) / 3600 =$$

$$550 (400 \cdot 10 + 387,5 \cdot 1,5 + 362,5 \cdot 1,0 + 337,5 \cdot 1,0 +$$

$$+ 312,5 \cdot 1,5 + 400 \cdot 3,5 + 360 \cdot 3,5 + 288 \cdot 3,5 +$$

$$+ 228 \cdot 4,5) / 3600 = 550 \cdot 10444 / 3600 = 1596 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Таблица 5 – Данные для построения кривой тока $I(t)$

Точки кривой $V(t)$	t, с	Δt , с	V, км/ч	I, А	$I_{л}$, А	$I_{л.ср}$, А	$I_{ср}$, А	$I_{ср}^2$, А ²
1	2	3	4	5	8	9	6	7
0	0		0	200	400	-	-	-
1	5	5	20	200	400	400	200	40000
2	10	5	30	200	400	400	200	40000
3	11,5	1,5	31	187,5	375	387,5	193,75	37539
4	12,5	1	32	175	350	362,5	181,25	32852
5	13,5	1	33	162,5	325	337,5	168,75	28477
B_1	15	1,5	35	150	300	312,5	156,25	24414
A	30	-	25	200	400	-	-	-
6	33,5	3,5	30	200	400	400	200	40000
7	37	3,5	35	160	320	360	180	32400
8	40,5	3,5	40	128	256	288	144	20736
B_2	45	4,5	45	100	200	228	114	12996

Для определения полного расхода энергии следует учесть расход энергии на собственные нужды поезда и потери электроэнергии в контактной сети и в преобразователях тяговой подстанции:

$$A_n = (A + A_{сн}) / (\eta_{ТС} \cdot \eta_{ПСТ}),$$

где $\eta_{ст}$ - средний КПД тяговой сети, равен 0,93;

$\eta_{пст}$ - средний КПД тяговой подстанции, равный 0,95;

$A_{сн}$ - энергия, расходуемая на собственные нужды, Вт·ч,

определяется по выражению

$$A_{сн} = P_{сн} (t_x + t_0) / 3600.$$

Здесь $P_{сн}$ - средняя мощность нагрузки собственных нужд, Вт;

t_x - время хода поезда по перегону, с;

t_0 - время стоянки на остановке, с.

Ориентировочно на одну единицу подвижного состава разных типов трамвая и троллейбуса $P_{сн} = 1,5 \dots 3,5$ кВт. Если принять $P_{сн} = 2000$ Вт и в соответствии с рис. 8 $t_x = 70$ с, $t_0 = 15$ с, то получаем:

$$A_{сн} = 2000(70+15)/3600 = 47,2 \text{ Вт}\cdot\text{ч};$$

$$A_n = (1596 + 47,2) / (0,93 \cdot 0,95) = 1860 \text{ Вт}\cdot\text{ч}.$$

Для оценки эффективности работы подвижного состава вводится понятие удельного расхода электроэнергии, Вт·ч/(кН·км),

$$A_{n.уд} = A_n / (G \ell_{пер}),$$

где $G = mg$ – вес подвижного состава, кН;

$\ell_{пер}$ - длина перегона, км.

Если принять $G = 250$ кН и $\ell_{пер} = 500$ м, тогда получаем

$$A_{n.уд} = 1860 / (250 \cdot 0,5) = 14,88 \text{ Вт}\cdot\text{ч} / (\text{кН}\cdot\text{км}).$$

Аналитический расчет расхода энергии на движение поезда

Сущность этого метода состоит в том, что рассчитываются отдельные составляющие расхода электроэнергии, а именно:

- 1) расход энергии на преодоление полного сопротивления движению поезда на перегоне A_w ;
- 2) расход энергии в тормозных устройствах A_T ;
- 3) расход энергии в пусковых резисторах $A_{n.p}$ (при контакторно-реостатном управлении ЭПС).

Расход электроэнергии на движение поезда весом G , кН, по перегону длиной $\ell_{пер}$ м, на котором не производят дополнительные подтормаживания и пуски, рассчитывается по формуле

$$A = A_{мх} / \eta_{ср} + A_{n.p} = (A_w + A_T) / \eta_{ср} + A_{n.p}, \quad (9)$$

где $A_{mx} = A_w + A_T$ - механическая работа, совершаемая тяговыми двигателями, равная сумме работы сил сопротивления движению и работы, затрачиваемой на остановочное торможение;

η_{cp} - среднее значение КПД двигателей на обода движущих колес.

Составляющие расхода электроэнергии, Вт·ч, рассчитывают по формулам:

$$A_w = G(w_{ox.cp} + w_{iэ})\ell_{nep} / 3600; \quad (10)$$

$$A_T = G \left[\frac{V_T^2}{2 \cdot 3,6^2} (102 \cdot K_u - \frac{w_T + w_{iT}}{a_T}) \right] / 3600; \quad (11)$$

$$A_{n.p} = K_{II} G \left[\frac{V_n^2}{2 \cdot 3,6^2} (102 \cdot K_u + \frac{w_n + w_{in}}{a_n}) \right] / 3600; \quad (12)$$

где $w_{ox.cp}$ - среднее по всему перегону значение удельного основного сопротивления движению без тока, Н/кН;

$w_{iэ} = i_э$ - удельное сопротивление движению от эквивалентного по расходу энергии уклона $i_э$, ‰, вдоль всего перегона, Н/кН;

V_T - скорость в момент начала торможения, км/ч;

$K_{II} = 1 + \gamma$ - коэффициент инерции вращающихся частей поезда;

w_T - среднее значение удельного основного сопротивления движению под током на тормозном пути, Н/кН;

w_{iT} - удельное сопротивление движению от уклона, Н/кН, равное среднему на тормозном пути уклону i_T , ‰;

a_T - среднее замедление на тормозном пути, м/с²;

K_{II} - коэффициент пуска (коэффициент пусковых потерь);

V_n - скорость в конце пуска, км/ч;

w_n - среднее значение удельного основного сопротивления движению под током за время пуска, Н/кН;

$w_{in} = i_n$ - удельное сопротивление движению, Н/кН, от среднего за период пуска уклона i_n , ‰;

a_n - среднее ускорение на пусковом пути, м/с^2 .

Пример. Рассчитать расход электроэнергии на движение поезда на заданном перегоне при движении слева направо

$\frac{i, \text{‰}}{\ell, \text{м}}$	100 \ 10	150 \ 35	$\frac{0}{150}$	7 / 200
$\frac{R_{кр, \text{м}}}{\ell_{кр, \text{м}}}$	_____	_____	$\frac{50}{50}$	_____

Исходные данные: ЭПС – трамвай, $G=200\text{кН}$, $\ell_{пер}=600\text{м}$, $t_x=90\text{с}$,

$V_T=25\text{км/ч}$, $V_n=18\text{км/ч}$, $a_n=1,5\text{м/с}^2$, $a_T=1,3\text{м/с}^2$, $\kappa_H = (1 + \gamma) = 1,125$,

$\eta_{ср}=0,92$, $K_n=1$.

Определяем эквивалентный по расходу энергии уклон

$$i_{\text{э}} = \frac{1}{\ell_{пер}} (i_{нд} \ell_{нд} + w_{кр} \ell_{кр} - i_{б} \ell_{б} - w_{ox.ср} \ell_B) =$$

$$\frac{1}{600} (7 \cdot 200 + 9 \cdot 50 - 10 \cdot 100 - 12,5 \cdot 150) =$$

$$\frac{1}{600} (1400 + 450 - 1000 - 1875) = -\frac{1025}{600} = -1,7 \text{‰}.$$

Здесь:

$$w_{ox.ср} = 9 + 0,005 \cdot (1,1 \cdot V_x)^2 = 9 + 0,005 \left(1,1 \frac{\ell_{пер}}{t_x} 3,6 \right)^2 =$$

$$= 9 + 0,005 \left(1,1 \frac{600}{90} 3,6 \right)^2 = 9 + 0,005 \cdot 700 = 12,5 \text{ Н / кН};$$

$$w_{кр} = 450 / R_{кр} = 450 / 50 = 9 \text{ Н/кН}.$$

Расход энергии на преодоление полного сопротивления движению трамвая

$$A_w = G(w_{ox.ср} + w_{iэ}) \ell_{пер} / 3600 = 200(12,5 - 1,7)600 / 3600 =$$

$$= 200 \cdot 10,8 \cdot 600 / 3600 = 360 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Расход энергии в тормозах при остановке поезда

$$A_T = \frac{G}{3600} \cdot \frac{V_T^2}{2 \cdot 3,6^2} (102 \cdot K_{II} - \frac{w_T + w_{iT}}{a_T}) =$$

$$= \frac{200}{3600} \cdot \frac{25^2}{2 \cdot 3,6^2} (102 \cdot 1,125 - \frac{6,5 + 7}{1,3}) = 140 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Здесь $w_T = w_{o.cp} = 5 + 0,005(0,7 \cdot V_T)^2 = 5 + 0,005(0,7 \cdot 25)^2 = 6,5 \text{ Н} / \text{кН};$

$w_{iT} = i_T = 7 \text{ Н} / \text{кН}$, так как тормозной путь $\ell_T = \frac{V_T^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot a_T} = \frac{25^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot 1,3} = 18,5 \text{ м}$

находится в пределах длины подъема с уклоном $i = 7 \text{ ‰}$.

Расход энергии в пусковых резисторах при пуске поезда

$$A_{n.p} = \frac{\kappa_n \cdot G}{3600} \cdot \frac{V_n^2}{2 \cdot 3,6^2} (102 \cdot K_{II} + \frac{w_n + w_{in}}{a_n}) =$$

$$= \frac{1 \cdot 200}{3600} \cdot \frac{18^2}{2 \cdot 3,6^2} (102 \cdot 1,125 + \frac{5,79 - 10}{1,5}) = 78 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Здесь $w_n = w_{o.cp} = 5 + 0,005(0,7 \cdot V_n)^2 = 5 + 0,005(0,7 \cdot 18)^2 = 5,79 \text{ Н} / \text{кН};$

$w_{in} = i_n = -10 \text{ Н/кН}$, так как пусковой путь

$$\ell_n = \frac{V_n^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot a_n} = \frac{18^2}{2 \cdot 12,96 \cdot 1,5} = 8,1 \text{ м}$$
 находится в пределах длины

спуска с уклоном $i = -10 \text{ ‰}$.

Расход энергии на движение поезда по перегону:

$$A = \frac{A_w + A_T}{\eta_{CP}} + A_{np} = \frac{360 + 140}{0,92} + 78 = 621 \text{ Вт} \cdot \text{ч},$$

$$A_{y\partial} = \frac{A}{G \ell_{пер}} = 621 / (200 \cdot 0,6) = 5,67 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / (\text{кН} \cdot \text{км}).$$

К расходу энергии на движение поезда необходимо добавить расход ее на собственные нужды поезда, который можно рассчитать по формуле

$$A_{сн,y\partial} = \frac{10^3 \div P_{сн}}{G V_{сн}} = \frac{10^3 \cdot 2}{200 \cdot 20,57} = 0,486 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / (\text{кН} \cdot \text{км}).$$

Здесь $P_{сн} = 2 \text{ кВт}$ – мощность нагрузки собственных нужд;

$G = 200 \text{ кН}$ – вес трамвая;

$V_{сн}$ – скорость сообщения на перегоне:

$$V_{cn} = \frac{3,6 \cdot \ell_{nep}}{t_x + t_0} = \frac{3,6 \cdot 600}{90 + 15} = 20,57 \text{ км/ч.}$$

Общий удельный расход энергии $A_{n,yd}$, Вт·ч/(кН·км), отнесенный к первичной стороне тяговых подстанций,

$$A_{n,yd} = \frac{K_A}{\eta_{TC} \cdot \eta_{ПТС}} (A_{yd} + A_{cn,yd}) = \frac{1,1}{0,93 \cdot 0,95} (5,67 + 0,486) = 7,66 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{кН} \cdot \text{км}}.$$

Здесь с помощью коэффициента $K_A = 1,1$ учтен расход энергии на дополнительные подтормаживания и пуски, возможные при движении поезда.

5. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ДВИЖЕНИЯ

Расчет и построение кривых движения поезда основан на интегрировании уравнений движения поезда, связывающих между собой переменные V , l и t в дифференциальной форме.

Практически интегрируют уравнения движения методом конечных приращений, сущность которого заключается в замене бесконечно малых приращений dV , dt , dl конечными приращениями ΔV , Δt , Δl . Этот метод пригоден при любой форме кривой равнодействующей силы $f_D(V)$ и включает в себя графоаналитические способы и графические, отличающиеся друг от друга приемами определения Δt и Δl . При графоаналитических способах для каждого интервала ΔV вычисляют Δt и Δl и по ним вычерчивают кривые движения. Графические способы отличаются тем, что Δt и Δl не вычисляют, а находят геометрическими построениями в виде отрезков линий в определенных масштабах. Эти способы имеют много разновидностей. Под графоаналитическим способом обычно подразумевают ту его модификацию, при которой действительную кривую $f_D(V)$ заменяют ступенчатой линией при допущении, что равнодействующая сила остается постоянной и равной ее среднему значению

$f_{дср}$ в каждом рассматриваемом интервале скорости ΔV . Расчет Δt и Δl при измерении скорости V в км/ч производят по формулам:

$$\Delta t_n = \frac{28,3(1 + \gamma)\Delta V_n}{f_{д.ср.n}}, c; \quad (13)$$

$$\Delta \ell_n = V_{ср.n} \cdot \Delta t_n / 3,6, м, \quad (14)$$

где $f_{д.ср.n}$ - значение удельной равнодействующей силы, Н/кН, для любого монотонно изменяющегося участка кривой $f_d(V)$, соответствующее средней скорости $V_{ср.n}$ в n -ом интервале ΔV_n для последовательного ряда интервалов скорости ΔV .

Интервалы ΔV выбирают большими для пологих участков кривой $f_d(V)$ и существенно меньшими для крутых ее частей. Абсциссы точек перелома кривых $f_d(V)$, следует принимать в качестве границ смежных интервалов ΔV , что увеличивает точность расчета. Кривые движения при этом способе строят по точкам.

Пример. Рассчитать и построить графоаналитическим способом кривые движения $V(l)$ и $t(l)$ на перегоне с постоянным уклоном.

Исходные данные: тип ЭПС – трамвайный моторный вагон КТМ – 5М с тяговыми двигателями ДК-259Г-3, вес $G=200$ кН, среднее пусковое ускорение $a_n=1,2$ м/с², коэффициент инерции вращающихся частей вагона $\kappa_u = (1 + \gamma) = 1,12$, уклон $i=5\%$, длина перегона $\ell_{пер} = 400$ м, характеристики ускоряющей силы $f_0(V)$, замедляющей силы $b_0(V)$ и силы сопротивления движению $w_{0x}(V)$ представлены на рис.9. Характеристика $f_0(V)$ построена на основании данных графы 7 табл.4 в масштабах $m_f = 0,92$ мм/(Н/кН) и $m_v = 2$ мм/(км/ч). В тех же масштабах построены характеристики $b_0(V)$ и $w_{0x}(V)$ по данным табл.6.

Таблица 6 - Данные для построения характеристик $b_o(V)$ и $W_{ox}(V)$

V, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70
$w_{ox} = 9 + 0,005V^2$, Н/кН	9	9,5	11	13,5	17	21,5	27	33,5
$w_o = 5 + 0,005V^2$, Н/кН	5	5,5	7	9,5	13	17,5	23	29,5
$b = 0,8f_n$, Н/кН	114,4	114,4	114,4	114,4	114,4	114,4	114,4	114,4
$b_o = b + w_o$, Н/кН	119,4	119,9	121,4	123,9	127,4	131,9	137,4	143,9

Для учета профиля переносим начало координат на рис.9 вверх на отрезок $OO_1 = im_f = 5 \cdot 0,92 = 4,6$ мм и проводим горизонтальную линию O_1O_1' , от которой должны отсчитываться значения равнодействующей силы $f_{o.cp}$. Максимальная скорость движения V_{max} равняется установившейся скорости движения V_y и составляет 55 км/ч. Эта скорость определяется абсциссой точки А пересечения кривой $f_o(V)$ с прямой O_1O_1' . Расчет и построение кривых движения начинают с момента трогания поезда при $V=0$. Результаты расчетов записаны в табл.7, по которым на рис.10 построены кривые движения $V(l)$ и $t(l)$ на перегоне длиной 400м.

Сначала были рассчитаны координаты точек кривых $V(l)$ и $t(l)$ для режима тяги от $V=0$ до $V=V_y=55$ км/ч с использованием кривой $f_o(V)$ на рис.9. Первый интервал скорости ΔV_1 был взят равным значению пусковой скорости $V_{II}=17$ км/ч, так как на этом интервале действующая сила $f_o = f_0 - w_i$ изменяется незначительно. Далее ΔV принимались равными 6, 5, 4 и 3 км/ч, а при приближении к скорости V_y - 2 км/ч. Затем были рассчитаны координаты точек кривых движения для режима торможения от значения $V=0$ до $V_T = 30$ км/ч с использованием кривой $b_o(V)$ и далее в том же обратном порядке рассчитаны координаты точек кривых движения на выбеге от скорости $V_T=30$ км/ч до $V=45$ км/ч с использованием кривой $W_{ox}(V)$. Для большей скорости вести расчет нецелесообразно, так как при $V=45$ км/ч суммарная длина пути

$$\ell_I + (\ell_T + \ell_B) = 1530 + 265,43 = 418,43 > \ell_{nep} = 400 \text{ м}.$$

Таблица 7 – Результаты графоаналитического расчета кривых движения поезда $V(\ell)$ и $t(\ell)$

Режим движения	№п/п	V, КМ/ч	ΔV , КМ/ч	V_{cp} , КМ/ч	$f_{\partial, cp}$, Н/кН	Δt , с	t, с	Δl , м	l , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тяга	0	0	-	-	-	-	0	-	0
	1	17	17	8,5	132,3	4,07	4,07	9,61	9,61
	2	23	6	20	119,7	1,59	5,66	8,83	18,44
	3	28	5	25,5	99,3	1,6	7,26	11,3	29,74
	4	33	5	30,5	81,1	1,95	9,21	16,5	46,24
	5	37	4	35	60,3	2,1	11,31	20,4	66,64
	6	41	4	39	41,7	3,04	14,35	32,9	99,54
	7	45	4	43	28,3	4,48	18,83	53,5	153
	8	48	3	46,5	17,4	5,46	24,29	70,5	223,5
	9	51	3	49,5	10,2	9,32	33,61	128,2	351,7
	10	53	2	52	5,6	11,32	44,93	163,5	515,2
	11	55	2	54	1,6	39,6	84,5	594	1109
Торможение	0	0	-	-	-	-	0	-	0
	1	5	5	2,5	124,5	1,273	1,273	0,9	0,9
	2	10	5	7,5	124,6	1,272	2,545	2,65	3,55
	3	15	5	12,5	125,1	1,267	3,812	4,4	7,95
	4	20	5	17,5	125,7	1,261	5,073	6,13	14,08
	5	25	5	22,5	126,8	1,25	6,323	7,81	21,89
	6	30	5	27,5	127,9	1,239	7,562	9,46	31,35

Продолжение табл. 7.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Выбег	0	30	-	-	-	-	7,562	-	31,35
	1	35	5	32,5	19,3	8,211	15,773	74,13	105,48
	2	40	5	37,5	21	7,547	23,32	78,61	184,09
	3	45	5	42,5	23	6,89	30,21	81,34	265,43
Тяга	6	41	4	39	41,7	3,04	14,35	32,9	99,54
	7'	44,5	3,5	42,75	28,8	3,85	18,2	45,71	145,25
Выбег	2	40	5	37,5	21	7,547	23,32	78,61	184,09
	3'	44,5	4,5	42,25	22,93	6,22	29,54	73	257,1

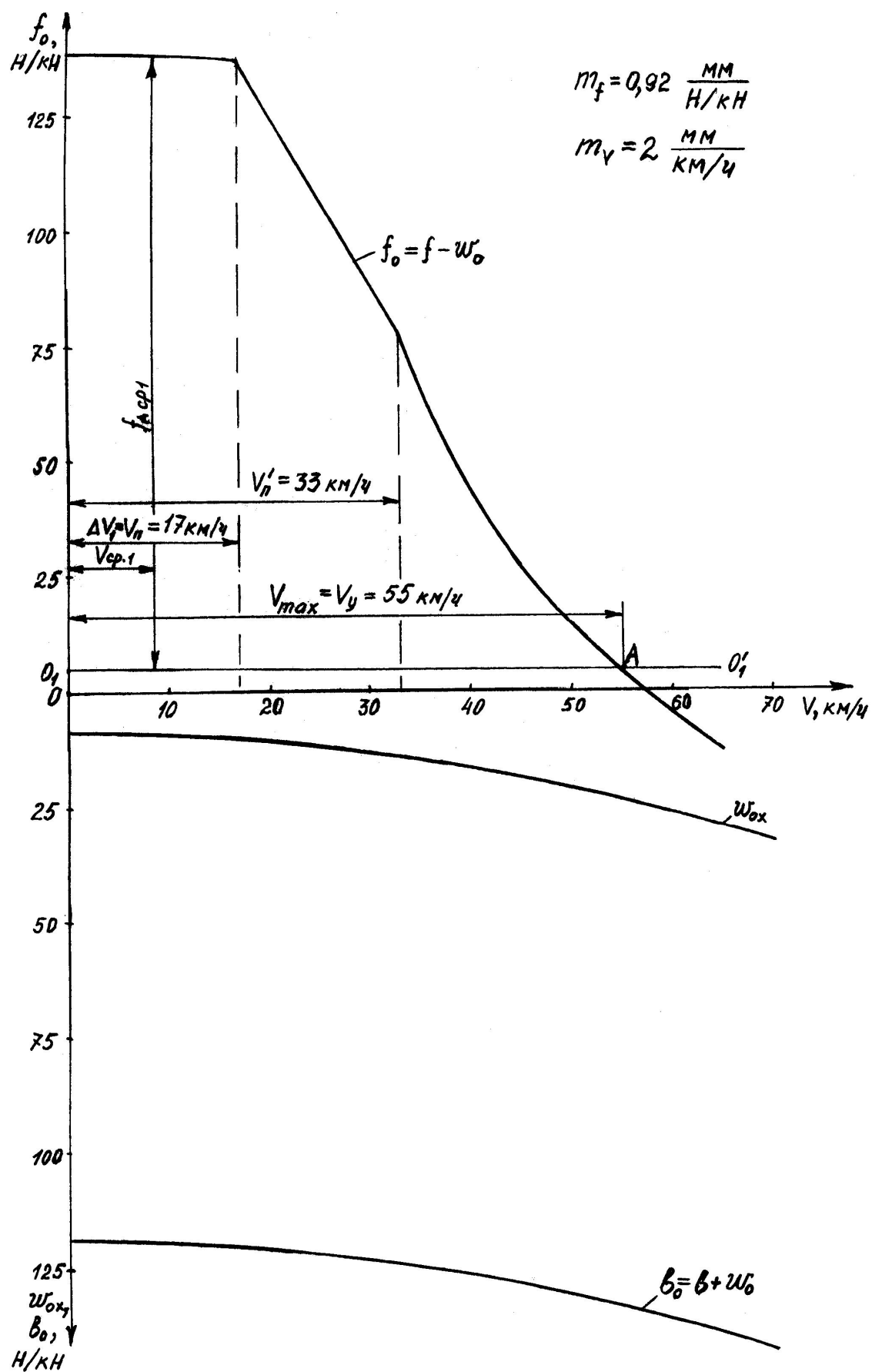


Рис.9 – Характеристики $f_0(V)$, $b_0(V)$, $w_{ox}(V)$ трамвайного вагона КТМ-5М с ТЭД ДК-259Г-3

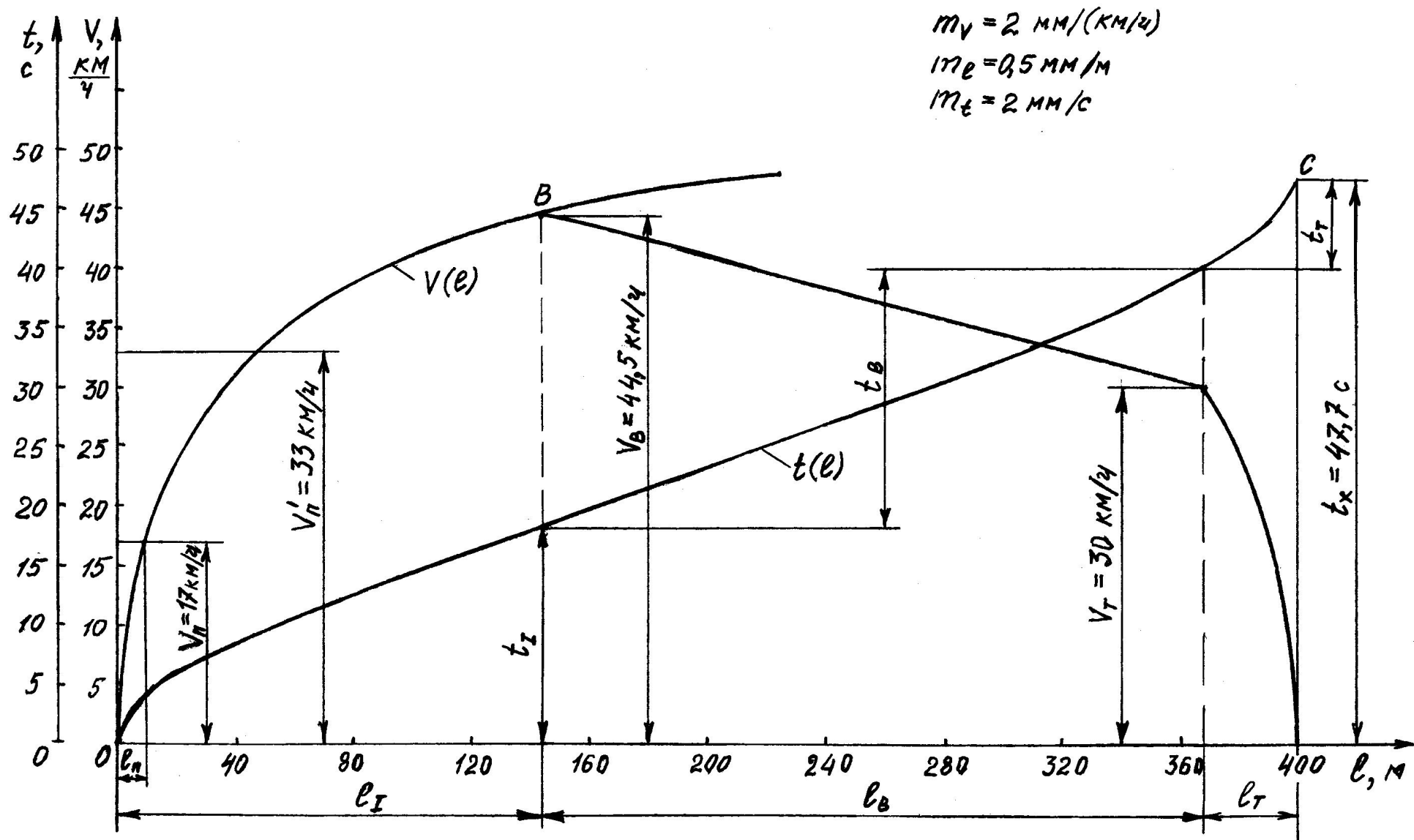


Рис. 10 – Кривые движения $V(l)$ и $t(l)$ вагона трамвая КТМ-5М

Кривая движения $V(l)$ на перегоне строилась в таком порядке. Вначале по точкам был построен участок кривой для режима тяги от $V=0$ до $V=48$ км/ч, а затем в обратном порядке с конца перегона участок кривой торможения и далее участок кривой выбега до пересечения с кривой тяги в точке В при $V=44,5$ км/ч. После этого были определены длины граничных интервалов скорости для режимов тяги и выбега, выполнены расчеты приращений времени и пути и занесены соответственно в строки 7' и 3' табл.7. Сумма расчетных длин $\ell_I + (\ell_T + \ell_B) = 145,25 + 257,1 = 402,35$ м получилась больше реальной длины перегона $\ell_{пер} = 400$ м на 2,35 м, что вполне допустимо.

Кривая $t(l)$ построена по точкам. К значению времени $t_I = 18,2$ с (см. табл.7, строку 7') последовательно добавляли приращения времени движения на выбеге и торможении. Время движения по перегону соответствует ординате точки С кривой $t(l)$ и равно $t_x = 47,7$ с, средняя (ходовая) скорость на перегоне $V_x = (\ell_{пер} / t_x) \cdot 3,6 = (400 / 47,7) \cdot 3,6 = 30,2$ км/ч.

6. ТОРМОЗНЫЕ ЗАДАЧИ

Безаварийная работа городского электротранспорта зависит от тормозных средств, режима движения, профиля пути и коэффициента сцепления, а потому между скоростью движения, уклоном, на котором возможно торможение, наличием тормозных средств и длиной тормозного пути должна существовать строго определенная зависимость, установление которой является предметом тормозных задач. На городском транспорте наиболее часто встречаются следующие разновидности тормозных задач:

- 1) определение допустимой скорости на заданном уклоне при заданных тормозных средствах и длине тормозного пути;
- 2) определение тормозной силы для безопасного движения с заданной скоростью по заданному уклону и заданному тормозному пути;
- 3) определение расчетной длины тормозного пути при заданных скоростях начала торможения, профиля пути и тормозных средствах;

- 4) определение максимального уклона, на котором может быть выдержан заданный тормозной путь при заданных скоростях движения и тормозных средствах.

При решении тормозных задач необходимо различать два понятия о тормозном пути: а) расчетный тормозной путь ℓ_{mp} - полный путь, проходимый транспортной единицей за время подготовки тормозов к действию, с учетом времени реакции водителя на сигнал, и за время от начала торможения до остановки; б) действительный тормозной путь ℓ_m - путь, пройденный за время фактического торможения подвижного состава.

Расчетный тормозной путь равняется

$$\ell_{mp} = \ell_m + \ell_n, \quad (15)$$

где ℓ_n - длина пути за время t_n подготовки тормозов к действию.

Путь ℓ_n рассчитывают допуская, что подвижной состав проходит его с постоянной скоростью начала торможения V_T , км/ч:

$$\ell_n = \frac{1}{3,6} V_T t_n, \text{ м.} \quad (16)$$

Время t_n расходуется, главным образом, на реакцию водителя; ориентировочно принимают для вагонов метрополитена $t_n = 2$ с, для трамваев и троллейбусов $t_n = 1$ с.

Тормозные задачи решаются аналитическими или графическими способами. Графические способы решения тормозных задач более наглядны и точнее, нежели аналитические. При решении тормозных задач полезно иметь кривые удельной действующей тормозной силы в зависимости от скорости движения подвижного состава, т.е.

$$f_d = -(b_0 + w_i) = -(b + w_0 + w_i) = f(V), \quad (17)$$

так как тормозная сила b и основное сопротивление движению w_0 изменяются с изменением скорости движения.

Под b_0 понимают удельную замедляющую силу на прямом горизонтальном пути для механических ($b_0 = b + w_{0x}$) или электрических ($b_0 = b + w_0$) тормозов, а также при их совместном действии. На кривых участках пути дополнительно учитывают удельное сопротивление от кривой $w_{кр}$.

При механических барабанных тормозах удельная, т.е. отнесенная к одному килоньютону веса подвижного состава, тормозная сила определяется выражением:

$$b = 1000 \cdot \theta \cdot \varphi_k, \text{ Н/кН}, \quad (18)$$

где φ_k - коэффициент трения между поверхностью тормозного барабана (накладкой) и колодкой;

θ - тормозной коэффициент поезда, представляющий собой относительное значение суммарной приведенной к ободу тормозных колес силы нажатия тормозных колодок, приходящуюся на 1 кН веса поезда (таре):

$$\theta = \frac{\sum K_n}{G} = \frac{\sum K_n}{mg}, \quad (19)$$

откуда

$$\sum K_n = \theta \cdot G. \quad (20)$$

Равенство (20) при тяговых расчетах позволяет обходиться без расчета нажатия тормозных колодок или накладок тем более, что для такого расчета обычно отсутствуют нужные сведения.

Коэффициент φ_k зависит в основном от материала трущихся поверхностей, скорости трущейся поверхности, а следовательно, скорости движения и силы нажатия K на тормозную колодку. На значение φ_k влияет также форма тормозной колодки, состояние трущихся поверхностей (попадание между трущимися поверхностями смазочных веществ, воды, грязи) и температура.

Основанием для определения значения φ_k могут быть только опытные данные. С учетом проведенных испытаний можно предложить следующую

формулу для определения коэффициента трения барабанных тормозов с асбестовыми накладками на эбонитовой и бакелитовой основе:

$$\varphi_{\kappa} = \frac{0,25}{1 + 0,02V} \quad , \quad (21)$$

где V - скорость движения в км/ч.

На трамвайных вагонах при экстренном торможении используются рельсовые электромагнитные тормоза. На основании опытных данных выведена следующая формула расчета коэффициента трения для башмаков электромагнитных рельсовых тормозов:

$$\varphi_{mp} = \frac{0,18}{1 + 0,02V} \quad . \quad (22)$$

Приведенное суммарное нажатие $\sum K_n$ тормозных колодок ограничивается сцеплением колес с рельсом или полотном дороги. Для барабанного тормоза для предотвращения юза необходимо соблюдать условие

$$B = 1000\varphi_{\kappa} \sum K_n \leq 1000G_T\psi \quad (23)$$

или

$$\frac{\sum K_n}{G_T} \leq \frac{\psi}{\varphi_{\kappa}} \quad , \quad (24)$$

где ψ - коэффициент сцепления и G_T - тормозной вес поезда.

Отношение наибольшего суммарного нажатия тормозных колодок $\sum K_{n \max}$ к силе нажатия тормозных колес на рельсы или полотно дороги G_T называют коэффициентом нажатия δ тормозных колодок:

$$\delta = \frac{\sum K_{n \max}}{G_T} \quad . \quad (25)$$

При условии, что все оси (колеса) подвижного состава тормозные и, следовательно, тормозной вес G_T равен весу поезда $G = mg$, наибольший тормозной коэффициент будет равен коэффициенту нажатия: $\theta_{\max} = \delta$. Такое значение тормозного коэффициента следует выбирать при экстренном торможении. При рабочем торможении тормозной коэффициент $\theta = (0,6 \dots 0,7) \theta_{\max}$.

Величину коэффициента нажатия выбирают так, чтобы получить по возможности наибольшую тормозную силу и в тоже время не допустить заклинивания колес. Наибольшая опасность заклинивания колес при торможении возникает при малых скоростях движения, так как коэффициент сцепления в меньшей степени, чем коэффициент трения колодок, зависит от скорости движения. В расчетах принимают следующие значения коэффициента нажатия δ от тормозного веса G_T пустого поезда: для вагонов метрополитена при колесно-колодочном тормозе $\delta=0,5\dots0,6$; для вагонов трамвая при барабанных и дисковых тормозах $\delta = 0,7\dots0,9$; для троллейбусов $\delta=1,5\dots2$; для трамвайных вагонов с рельсовым электромагнитным тормозом $\delta=2$.

Коэффициент сцепления изменяется в широких пределах в зависимости от условий движения подвижного состава. По этой причине нельзя рекомендовать какую-нибудь определенную величину для всех расчетов. Условия поставленной задачи определяют ту величину коэффициента, которой необходимо пользоваться в заданном случае. Например, при проектировании троллейбусных маршрутов по большим уклонам необходимо принимать минимальный коэффициент сцепления, так как при спуске машины по уклону могут произойти «заносы» и опрокидывание.

Аналитическое решение тормозных задач

Задача 1. Дано: моторный трамвайный вагон весом $G=200$ кН; тормозной коэффициент $\theta = 0,85$; спуск $i = -40\%$; тормозной путь $\ell_T = 20$ м; коэффициент инерции вращающихся частей $1+\gamma=1,15$. Требуется определить допустимую скорость.

Для вагона трамвая спуск $i = -40\%$ является вредным. На коротких вредных спусках допускается движение с постоянной допустимой скоростью посредством подтормаживания поезда. На длинных же вредных спусках необходимо предусмотреть остановку вагона. В этом случае тормозные средства должны быть достаточны для того, чтобы создать нужное замедление и обеспе-

чить остановку на надлежащей длине тормозного пути. Этим диктуется определенное ограничение скорости движения под уклон. Требуется решить тормозную задачу: определить начальную скорость торможения V_T при заданной величине тормозного пути ℓ_T .

Здесь два неизвестных – начальная скорость торможения и равнодействующая сила f_D , так как последняя является функцией скорости. Кроме того, возможная остановка здесь должна быть обеспечена при всех условиях движения, а потому в данном случае необходимо для тормозной силы ввести коэффициент запаса (надежности) $K_3 = 1,3$.

Приближенно эта задача может быть решена методом подбора (последовательных приближений). Задавшись значением $V_T = 20 \text{ км/ч}$, определим по формулам (21) и (18) соответственно значения φ_k и b , приняв в качестве расчетной скорость $V_p = 0,75 V_T = 0,75 \cdot 20 = 15 \text{ км/ч}$:

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1 + 0,02 V_p} = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot 15} = 0,192;$$

$$b = 1000 \cdot \theta \cdot \varphi_k = 1000 \cdot 0,85 \cdot 0,192 = 163,2 \text{ Н/кН}.$$

Удельное основное сопротивление движению без тока

$$w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V_p^2 = 9 + 0,005 \cdot 15^2 = 10,1 \text{ Н / кН}.$$

С учетом выбранного для тормозной силы коэффициента запаса $K_3 = 1,3$, находим

$$b_0 = \frac{b + w_{ox}}{K_3} = \frac{163,2 + 10,1}{1,3} = 133,3 \text{ Н / кН}.$$

Удельная равнодействующая тормозная сила

$$f_D = -(b_0 + w_i) = -(133,3 - 40) = -93,3 \text{ Н / кН}.$$

Для проверки правильности принятого значения скорости начала торможения, используем выражение для расчета приращения пути [2, формула (10.12)]:

$$\Delta \ell = 7,87(1 + \gamma) \frac{V_{\kappa}^2 - V_{\text{н}}^2}{2f_{\text{Дср}}} . \quad (26)$$

Приняв $\Delta \ell = \ell_T, V_{\kappa} = 0, V_{\text{н}} = V_T, f_{\text{Дср}} = f_{\text{Д}}$ на основании формулы (26) находим

$$V_T = \sqrt{\frac{2\ell_T f_{\text{Д}}}{7,87(1 + \gamma)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20 \cdot 93,3}{7,87 \cdot 1,15}} = 20,3 \text{ км/ч}.$$

Полученное значение скорости начала торможения несколько больше принятого предварительного значения. Так как разница невелика, то на этом расчет можно закончить, или же принять новое значение скорости, например, $V_T = 20,2$ км/ч и повторить расчет.

Задача 2. Дано: моторный трамвайный вагон весом $G = 200$ кН; спуск $i = -80\text{‰}$; тормозной путь $\ell_T = 20$ м; торможение электромагнитное рельсовое с тормозным коэффициентом нажатия тормозных башмаков $\theta_{\text{мр}} = 2$; коэффициент инерции вращающихся частей вагона $1 + \gamma = 1,15$; коэффициент запаса тормозной силы $K_s = 1,3$. Требуется определить допустимую скорость.

Решение данной задачи подобно предыдущей задаче. Задаемся предварительным значением начальной скорости торможения $V_T = 25$ км/ч. По формулам (22) и (18) определяем соответственно значения коэффициента $\varphi_{\text{мр}}$ и удельной тормозной силы b , приняв в качестве расчетной скорость $V_p = 0,75 V_T = 0,75 \cdot 25 = 18,75$ км/ч:

$$\varphi_{\text{мр}} = \frac{0,18}{1 + 0,02 \cdot V_p} = \frac{0,18}{1 + 0,02 \cdot 18,75} = \frac{0,18}{1,375} = 0,131;$$

$$b = 1000 \varphi_{\text{мр}} \theta_{\text{мр}} = 1000 \cdot 0,131 \cdot 2 = 262 \text{ Н/кН}.$$

Удельное основное сопротивление движению без тока

$$w_{\text{ох}} = 9 + 0,005 \cdot V_p^2 = 9 + 0,005 \cdot 18,75^2 = 10,76 \text{ Н/кН}.$$

Далее с учетом выбранного значения коэффициента запаса определяем удельную замедляющую силу на прямом горизонтальном пути и удельную равнодействующую тормозную силу:

$$b_0 = \frac{b + w_{ox}}{K_3} = \frac{262 + 10,76}{1,3} = 209,8 \text{ Н / кН};$$

$$f_D = -(b_0 + w_i) = -(209,8 - 80) = -129,8 \text{ Н / кН}.$$

Скорость начала торможения

$$V_T = \sqrt{\frac{2\ell_T f_D}{7,87(1+\gamma)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20 \cdot 129,8}{7,87 \cdot 1,15}} = 23,95 \text{ км / ч} < 25 \text{ км / ч}.$$

Очевидно, взятую предварительную скорость следует уменьшить, например, до 24 км/ч и повторить расчет:

$$V_T = 24 \text{ км/ч}; V_p = 0,75 \cdot V_T = 0,75 \cdot 24 = 18 \text{ км / ч};$$

$$\varphi_{mp} = \frac{0,18}{1 + 0,02 \cdot 18} = 0,132; \quad b = 1000 \cdot 0,132 \cdot 2 = 264 \text{ Н/кН};$$

$$w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot 18^2 = 10,6 \text{ Н / кН}; \quad b_0 = \frac{264 + 10,6}{1,3} = 211,2 \text{ Н / кН};$$

$$f_D = -(b_0 + w_i) = -(211,2 - 80) = -131,2 \text{ Н / кН};$$

$$V_T = \sqrt{\frac{2\ell_T f_D}{7,87(1+\gamma)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20 \cdot 131,2}{7,87 \cdot 1,15}} = 24,08 \text{ км / ч} \approx 24 \text{ км / ч},$$

т.е. результат достаточно близко совпадает с предварительно принятой во втором приближении скоростью 24 км/ч.

Задача 3. Дано: троллейбус весом $G=150$ кН; тормозной коэффициент $\theta = 2$; спуск $i=-80\%$; тормозной путь $l_T=15$ м; коэффициент инерции вращающихся частей $1+\gamma=1,15$; коэффициент запаса $K_3=1,5$. Требуется определить допустимую скорость.

Решение. Задаемся предварительным значением скорости $V_T = 25 \text{ км/ч}$. По формулам (21) и (18) определяем соответственно значения φ_k и b , приняв в качестве расчетной скорость $V_p = 0,75 \cdot V_T = 0,75 \cdot 25 = 18,75 \text{ км/ч}$:

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot V_p} = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot 18,75} = 0,182 ;$$

$$b = 1000 \cdot \theta \cdot \varphi_k = 1000 \cdot 2 \cdot 0,182 = 364 \text{ Н/кН}.$$

Далее последовательно рассчитываем значения w_{ox} , b_0 , f_d , V_T :

$$w_{ox} = 16 + 0,004 \cdot 18,75^2 = 17,4 \text{ Н/кН};$$

$$b_0 = \frac{b + w_{ox}}{K_3} = \frac{364 + 17,4}{1,5} = 254,3 \text{ Н/кН};$$

$$f_d = -(b_0 + w_i) = -(254,3 - 80) = -174,3 \text{ Н/кН};$$

$$V_T = \sqrt{\frac{2\ell_T f_d}{7,87(1 + \gamma)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 15 \cdot 174,3}{7,87 \cdot 1,15}} = 24 \text{ км/ч} < 25 \text{ км/ч}.$$

Принимаем $V_T = 24 \text{ км/ч}$ и повторяем расчет. В итоге получаем $V_T = 24,2 \text{ км/ч}$. Этим результатом можно ограничиться.

Задача 4. Дано: моторный трамвайный вагон, масса тары вагона 18т, масса пассажиров 5,5т; скорость 30км/ч; уклон $i = -80\%$. Требуется определить потребную тормозную силу для движения с постоянной скоростью 30км/ч.

Решение данной задачи легко находится непосредственно из уравнения движения поезда. Из условий задачи вытекает, что

$$f_d = b + w_{ox} + w_i = 0 \quad \text{или}$$

$$b = -(w_i + w_{ox}) = -(i + w_{ox}) = 80 - 13,5 = 66,5 \text{ Н/кН},$$

$$\text{где } w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V^2 = 9 + 0,005 \cdot 30^2 = 13,5 \text{ Н/кН}.$$

Тогда необходимая тормозная сила

$$B = b \cdot G = 66,5 \cdot (18 + 5,5) \cdot 9,81 = 15331 \text{ Н},$$

где G – вес вагона с пассажирами, кН.

Потребная величина суммарной приведенной силы нажатия тормозных колодок барабанного тормоза:

$$\sum K_n = \frac{B \cdot K_3}{1000 \cdot \varphi_k} = \frac{15331 \cdot 1,5}{0,156 \cdot 1000} = 147,4 \text{ кН},$$

где $K_3 = 1,5$ – коэффициент запаса тормозной силы;

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot V} = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot 30} = 0,156.$$

Таким образом, тормозной коэффициент должен быть:

$$\theta = \frac{\sum K_n}{mg} = \frac{147,4}{18 \cdot 9,81} = 0,83,$$

где $m = 18 \text{ т}$ – масса тары вагона.

Задача 5. Дано: моторный трамвайный вагон массой $m = 18 \text{ т}$, тормозной коэффициент $\theta = 0,85$, скорость начала торможения $V_T = 20 \text{ км/ч}$, тормозной путь $\ell_T = 30 \text{ м}$, тормоза механические барабанные, $1 + \gamma = 1,15$.

Требуется определить, какой максимальный уклон можно допустить на маршруте, с тем чтобы тормозной путь был не более заданного.

Решение. На основании формулы (26) при $\Delta \ell = \ell_T = 30 \text{ м}$, $V_H = V_T = 20 \text{ км/ч}$ и $V_k = 0$ рассчитываем значение средней равнодействующей тормозной силы:

$$f_d = -\frac{7,87(1 + \gamma) \cdot V_T^2}{2\ell_T} = -\frac{7,87 \cdot 1,15 \cdot 20^2}{2 \cdot 30} = -60,3 \text{ Н / кН}.$$

По формулам (21) и (18) рассчитываем значения соответственно φ_k и b при расчетной скорости $V_p = 0,666 V_T = 0,666 \cdot 20 = 13,3 \text{ км/ч}$:

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot V_p} = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot 13,3} = 0,197;$$

$$b = 1000 \theta \cdot \varphi_k = 1000 \cdot 0,85 \cdot 0,197 = 167,4 \text{ Н / кН}.$$

Удельное основное сопротивление движению без тока

$$w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V_p^2 = 9 + 0,005 \cdot 13,3^2 = 9,9 \text{ Н / кН}.$$

Выбираем коэффициент запаса $K_3=1,5$ и рассчитываем удельную тормозную силу на горизонтальном прямолинейном пути:

$$b_0 = \frac{b + w_{ox}}{K_3} = \frac{167,4 + 9,9}{1,5} = 118,2 \text{ Н / кН}.$$

На основании уравнения (17) находим искомый уклон

$$i = -b_0 - f_d = -118,2 + 60,3 = -57,9 \text{ ‰}.$$

Задача 6. Дано: моторный трамвайный вагон тормозится барабанными тормозами со скорости 30 км/ч. Тормозной коэффициент $\theta = 0,85$. Профиль пути: прямолинейный спуск $i = -10 \text{ ‰}$. Требуется определить длину тормозного пути.

Решение. Примем коэффициент инерции вращающихся масс $K_{и} = 1 + \gamma = 1,15$ и $\Delta V = 5 \text{ км / ч}$. Расчет производим по формулам:

$$\Delta \ell = \frac{7,87 (1 + \gamma) (V_n^2 - V_k^2)}{2 f_{дсп}} = \frac{4,52 (V_n^2 - V_k^2)}{f_{дсп}}, \text{ м};$$

$$f_{дсп} = b + w_{ox} + w_i = b + w_{ox} - 10, \text{ Н / кН};$$

Таблица 8 – Расчет длины тормозного пути вагона со скорости 30 км/ч

$V_n,$ км/ч	$V_K,$ км/ч	$V_n^2,$ км ² /ч ²	$V_K^2,$ км ² /ч ²	$V_n^2 - V_K^2,$ км ² /ч ²	$V_{cp},$ км/ч	φ_K	b, Н/кН	w_{ox} Н/кН	w_i Н/кН	$f_{Дср}$ Н/кН	$\Delta\ell,$ м	$\ell_{mp},$ м
30	25	900	625	275	27,5	0,161	137	12,8	-10	139,8	8,9	17,2
25	20	625	400	225	22,5	0,172	146	11,5	-10	147,5	6,9	24,1
20	15	400	225	175	17,5	0,185	157	10,5	-10	157,5	5	29,1
15	10	225	100	125	12,5	0,2	170	9,8	-10	169,8	3,3	32,4
10	5	100	25	75	7,5	0,217	185	9,3	-10	184,3	1,8	34,2
5	0	25	0	25	2,5	0,238	202	9,0	-10	201	0,6	34,8

$$b = 1000\theta\varphi_k = 1000 \cdot 0,85 \cdot \varphi_k = 850 \cdot \varphi_k, H / \kappa H;$$

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot V_{cp}}; \quad w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V_{cp}^2, H / \kappa H;$$

$$\ell_{mp} = \ell_T + \ell_n; \quad \ell_n = \frac{30}{3,6} \cdot 1 = 8,3 м.$$

Результаты расчета представлены в виде табл. 8.

Действительный тормозной путь

$$\ell_T = \sum \Delta \ell = 8,9 + 6,9 + 5,0 + 3,3 + 1,8 + 0,6 = 26,5 м.$$

Расчетный тормозной путь

$$\ell_{mp} = \ell_T + \ell_n = 26,5 + 8,3 = 34,8 м.$$

Графическое решение тормозных задач

Тормозные задачи можно решать более наглядно и во многих случаях более точно графическим способом, например «способом Липец-Лебедева». Для этого сначала выбирают масштабы скорости m_V , мм/(км/ч); пути m_ℓ , мм/м; удельной силы m_f , мм/(Н/кН), удовлетворяющие следующему равенству:

$$m_f = \frac{0,127 \cdot m_V^2}{(1 + \gamma)m_\ell}. \quad (27)$$

Рекомендуемые значения масштабов при условии, что $(1 + \gamma) = 1,1$ приведены в табл.9.

Таблица 9 – Рекомендуемые значения масштабов при решении тормозных задач

Тип транспорта	m_V , мм/(км/ч)	m_ℓ , мм/м	m_f , мм/(Н/кН)
метрополитен	1	0,25	0,462
Трамвай, троллейбус	2	2	0,231

При других значениях $(1 + \gamma)$ масштабы должны быть пересчитаны согласно формуле (27). В выбранных масштабах строится согласно заданию кривая тормозных сил $(b + w_{ox}) = f(V)$ и затем графически в зависимости от этой кривой и профиля пути строится кривая $V(l)$. Эти кривые дают возможность решать разнообразные тормозные задачи.

Задача 1. Определить допустимые скорости движения троллейбуса, если даны расчетный тормозной путь $\ell_{mp} = 30$ м, уклоны $i = -80\%$, $i = 0$ и $i = +80\%$, коэффициент $(1 + \gamma) = 1,1$.

При решении этой задачи исходим из случая экстренного торможения, при котором используются механические тормоза с наибольшим нажатием колодок. Характеристику удельной тормозной силы рассчитываем по формуле

$$b = 1000\varphi_k \theta_{\max}.$$

Значения коэффициента трения φ_k для барабанных тормозов рассчитываем по формуле (21): $\varphi_k = 0,25 / (1 + 0,02 \cdot V)$. Удельное основное сопротивление движению без тока рассчитываем по выражению

$$w_{ox} = 16 + 0,004V^2.$$

Принимаем $\theta_{\max} = 2$ и рассчитываем зависимость $(b + w_{ox}) = f(V)$.

Результаты расчета сводим в табл. 10.

Таблица 10 – Расчетные данные для построения характеристики $(b + w_{ox}) = f(V)$ троллейбуса

V, км/ч	0	10	20	30	40	50	60
φ_k	0,25	0,208	0,179	0,156	0,139	0,125	0,114
$b, \text{Н/кН}$	500	416	358	312	278	250	228
$w_{ox}, \text{Н/кН}$	16	16,4	17,6	19,6	22,4	26	30,4
$b + w_{ox}, \text{Н/кН}$	516	432,4	375,6	331,6	300,4	276	258,4

В масштабах, приведенных в табл. 9 строим характеристику $(b + w_{ox}) = f(V)$ (рис.11,а, кривая 1). Построенную кривую разделим на участки (интервалы), например, через каждые $\Delta V = 10 \text{ км/ч}$ (0-10; 10-20; 20-30 и т.д.); можно взять и меньшие интервалы. В пределах каждого интервала скорости действующую на поезд тормозную силу принимаем постоянной, определяемой ординатой средней точки каждого участка. Уровень отсчета ординаты средней точки определяется значением уклона, для которого определяется V_{\max} .

На диаграмме $V(\ell)$ (рис.11,б) по оси абсцисс в выбранном масштабе пути откладываем расчетный тормозной путь $\ell_{mp} = 30 \text{ м}$ и из его конца O' в обратном порядке (от $V=0$) графическим методом строим кривые торможения $V(l)$ для заданных уклонов $i = -80\text{‰}$, $i=0$ и $i = +80\text{‰}$.

Как видно из рис.11,а начало координат переносится на отрезок $OO_1 = m_f 80 = 18,5 \text{ мм}$ вверх по оси ординат в случае спуска и на отрезок $OO_2 = m_f 80 = 18,5 \text{ мм}$ вниз по оси ординат в случае подъема. Следует помнить, что подъем или спуск, выраженный в тысячных долях, численно равен удельной силе сопротивления от уклона, выраженной в Н/кН.

Для учета подготовительного пути достаточно для любой скорости V отложить от оси ординат отрезок $\ell_n = V t_n / 3,6 \text{ м}$, в выбранном масштабе пути и соединить его конец прямой линией с точкой O'' .

Для скорости $V=50 \text{ км/ч}$ путь подготовки $\ell_n = 50 \cdot 1/3,6 = 13,9 \text{ м}$, с учетом масштаба $m_\ell \ell_n = 2 \cdot 13,9 = 27,8 \text{ мм}$. Ординаты точек а, б, с пересечения этой прямой с кривыми $V(l)$ для заданных значений уклонов определяют допустимые скорости: $V_{\max 1} = 42 \text{ км/ч}$ на подъеме $i = 80\text{‰}$; $V_{\max 2} = 38 \text{ км/ч}$ на горизонтальном участке $i=0$; $V_{\max 3} = 35,5 \text{ км/ч}$ на спуске $i = -80\text{‰}$.

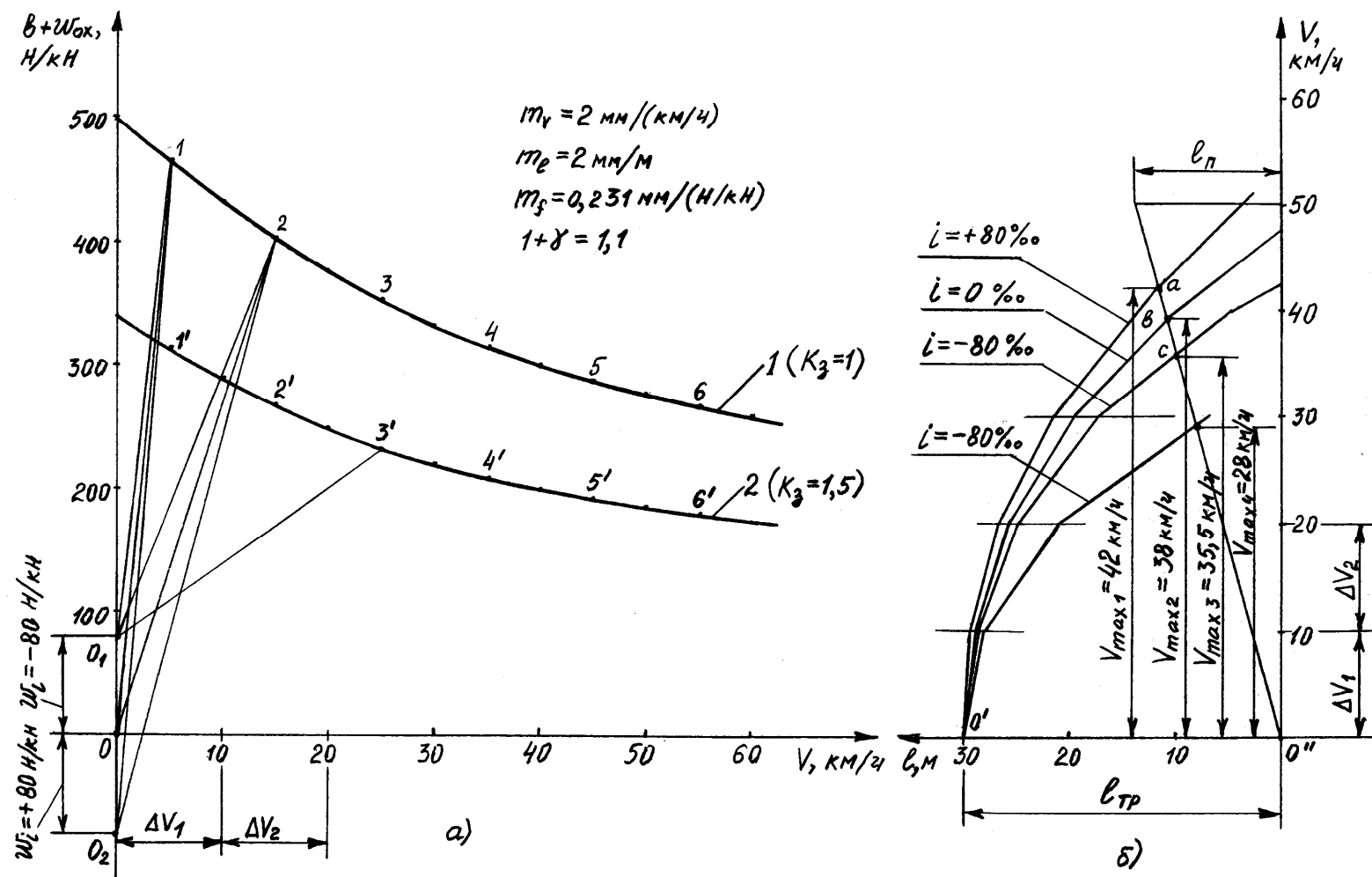


Рис. 11 – Определение допустимых скоростей движения троллейбуса

На рис. 11,а построена также характеристика $(b + w_{ox}) = f(V)$, соответствующая коэффициенту запаса $K_z=1,5$ (кривая 2), а на рис 11,б – кривая $V(l)$, соответствующая этой характеристике и уклону $i=-80\%$. Для указанных условий допустимая скорость $V_{max4} = 28\text{км/ч}$. В задаче №3 для примерно таких же условий торможения аналитически получена допустимая скорость $V_T=24,2\text{ км/ч}$.

Задача 2. Определить допустимые скорости движения трамвайного вагона, если заданы расчетный тормозной путь $\ell_{mp}=35\text{м}$, уклоны $i= -30\%$, $i=0$, $i=+40\%$ и коэффициент инерции вращающихся масс вагона $(1 + \gamma) = 1,1$.

Для трамвая в качестве экстренного торможения применяется рельсовое электромагнитное торможение. Удельная тормозная сила рельсового электромагнитного тормоза определяется выражением

$$b = 1000 \cdot \varphi_{mp} \theta_{max}.$$

В расчетах можно принять $\theta_{max}=2$, а коэффициент трения φ_{mp} определяется по формуле (22): $\varphi_{mp}=0,18/(1+0,02V)$. Выбираем расчетное выражение для удельного основного сопротивления движению вагона трамвая

$$w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V^2$$

и рассчитываем зависимость $(b + w_{ox}) = f(V)$. Результаты расчета представлены в виде табл. 11.

Таблица 11 – Расчетные данные для построения характеристики $(b + w_{ox}) = f(V)$ вагона трамвая

V,км/ч	0	10	20	30	40	50	60
φ_{mp}	0,18	0,15	0,1285	0,1125	0,1	0,09	0,082
$b=2000 \varphi_{mp}$, Н/кН	360	300	257	225	200	180	164
w_{ox} , Н/кН	9	9,5	11	13,5	17	21,5	27
$b + w_{ox}$, Н/кН	369	309,5	268	238,5	217	201,5	191

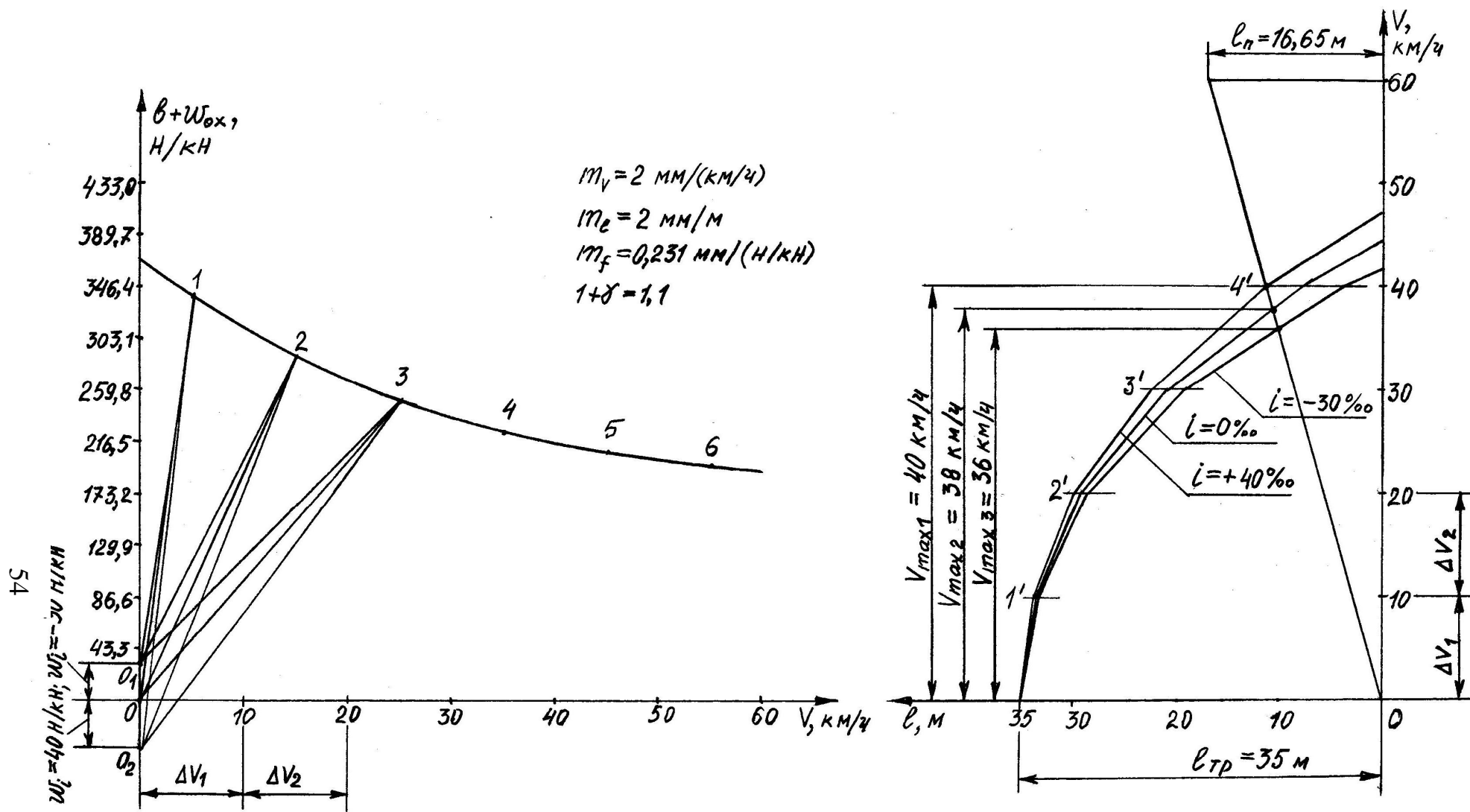


Рис. 12 – Определение допустимых скоростей движения трамвая

Графическое решение задачи в масштабах, приведенных в табл. 9 представлено на рис.12. Получены следующие значения допустимых скоростей движения трамвая: $V_{\max 1}=40\text{км/ч}$ на подъеме $i=+40\text{‰}$; $V_{\max 2}=38\text{км/ч}$ на горизонтальном участке $i=0$; $V_{\max 3}=36\text{км/ч}$ на спуске $i=-30\text{‰}$.

7. ПРОВЕРКА МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СПОСОБОМ СРЕДНЕГО КВАДРАТИЧНОГО ТОКА

Тяговый электрический двигатель при своей работе может нагреваться лишь до определенной, допустимой температуры, определяемой нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов.

Определение нагрева тяговых двигателей производят обязательно. Сущность проверки двигателя по нагреву состоит в сопоставлении допустимой для него температуры с той, которую он имеет при работе. Проверка может быть выполнена прямым методом, предусматривающим построение кривой перегрева $\tau(t)$ за цикл работы двигателя, и косвенными методами, не требующими построения графика $\tau(t)$. К их числу относится метод средних потерь мощности и основанные на этом методе методы эквивалентных величин: эквивалентного (среднеквадратичного) тока, эквивалентного момента и эквивалентной мощности.

Метод среднеквадратичного (эквивалентного) тока может быть использован в том случае, когда известен график изменения тока двигателя во времени, постоянные потери не изменяются за цикл работы, а сопротивления главных цепей двигателя остаются неизменными в цикле работы (не учитывается изменение сопротивления обмоток при изменении температуры).

Приближенная проверка пригодности двигателя по мощности сводится к сравнению среднего квадратичного тока нагрузки двигателя

$$I_{\text{ср. кв}} = \sqrt{\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} I^2 dt}$$
 за время t_p рейса (цикла) с его током I_∞ продолжительного номинального режима, являющимся паспортной величиной.

При расчетах среднеквадратичный ток двигателя за время рейса определяется по формуле

$$I_{cp.kв} = \sqrt{\frac{1}{t_p} (\sum I_{cp.i}^2 \Delta t_i + \sum I_{m.cp.i}^2 \Delta t_i)}, \quad (28)$$

где $I_{cp.i}$ и $I_{m.cp.i}$ - средние токи двигателя, определяемые в интервале времени Δt_i по кривым потребления тока соответственно в режимах тяги и реостатного торможения; $t_p = \sum t_x + \sum t_o$ - время рейса, равное сумме времен хода t_x и времени остановок $t_o = 15 \dots 20$ с.

В режимах реостатного торможения можно приближенно принять

$$I_m = 0,8I_n = const \text{ и } \sum I_{m.cp.i}^2 \Delta t_i = (0,8I_n)^2 t_T,$$

где t_T - время торможения до остановки.

Пригодность тягового двигателя по мощности определяется соотношением

$$I_{cp.kв} \leq \frac{I_\infty}{K_3} \text{ или } K_3 I_{cp.kв} \leq I_\infty, \quad (29)$$

где $K_3 = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент запаса, значение которого выбирается с учетом влияния на нагрев двигателя способа его охлаждения, температуры окружающей среды, неравномерности распределения нагрузок между параллельно соединенными двигателями, ухудшения реальных условий охлаждения, а также положенных в основу рассматриваемого способа допущений.

Если в результате проверки мощность двигателя окажется недостаточной, следует дать рекомендации по изменению режима движения подвижного состава, чтобы мощность двигателя была достаточной.

Если в результате проверки мощность двигателя окажется чрезмерной, следует дать рекомендации по способам лучшего использования тягового двигателя.

Пример вычисления $I_{cp.kв}$

Дано: ЭПС – трамвай; тип ТЭД – ДК259Г-3; кривые потребления тяговым двигателем тока (рис.8, табл.5);

$$I_\infty = 146 \text{ А; } t_o = 15 \text{ с; } t_x = 70 \text{ с; } t_p = 85 \text{ с; } I_m = 0,8I_n = 160 \text{ А; } t_T = 15 \text{ с.}$$

Определяем расход квадратичного тока при первом включении двигателей (пуск):

$$\sum I_{cp.i}^2 \Delta t_i = 40000 \cdot 5 + 40000 \cdot 5 + 37539 \cdot 1,5 + 32852 \cdot 1,0 + 28477 \cdot 1,0 + 24414 \cdot 1,5 = 554258 \text{ A}^2 \text{ c.}$$

Определяем расход квадратичного тока при повторном включении двигателей:

$$\sum I_{cp.i}^2 \Delta t_i = 40000 \cdot 3,5 + 32400 \cdot 3,5 + 20736 \cdot 3,5 + 12996 \cdot 4,5 = 384458 \text{ A}^2 \text{ c.}$$

Определяем расход квадратичного тока при электрическом торможении:

$$\sum I_{m.cp.i}^2 \Delta t_i = (0,8 I_n)^2 t_T = 160^2 \cdot 15 = 384000 \text{ A}^2 \text{ c.}$$

Определяем среднеквадратичный ток двигателя

$$I_{cp.кв} = \sqrt{\frac{1}{t_p} [\sum I_{cp.i}^2 \Delta t_i + (0,8 I_n)^2 t_T]} = \sqrt{\frac{1}{85} [554258 + 384458 + 384000]} = 125 \text{ A.}$$

С учетом коэффициента запаса $K_3=1,15$ получаем

$$K_3 \cdot I_{cp.кв} = 1,15 \cdot 125 = 144 \text{ A.}$$

Полученное значение сравниваем с током продолжительного номинального режима $I_\infty = 146 \text{ A}$:

$$I_\infty = 146 \text{ A} > K_3 \cdot I_{cp.кв} = 144 \text{ A.}$$

Вывод: нагрев двигателя не превышает установленной ГОСТом нормы.

8. ВЫБОР МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Полезная мощность тягового электрического двигателя (ТЭД), развиваемая на обode движущего колеса,

$$P = F_k V / (3,6 \cdot 10^3), \text{ кВт}, \quad (30)$$

где F_k - сила тяги, создаваемая двигателем на обode движущего колеса, Н;

V - скорость движения, км/ч.

Эту механическую мощность можно выразить через электрическую мощность $P_1 = U_k I$, потребляемую двигателем,

$$P=U_K I \cdot \eta \cdot 10^{-3} \text{ кВт}, \quad (31)$$

где U_K - напряжение на зажимах (коллекторе) двигателя, В;

I - ток якоря, А;

η - КПД двигателя на ободу колеса.

При работе электроподвижного состава (ЭПС) все величины, входящие в оба эти уравнения, не остаются постоянными, чем вызывается изменение в очень широких пределах мощности, развиваемой двигателями. Такой характер работы очень затрудняет определение величины необходимой номинальной мощности двигателей и позволяет сделать лишь предварительный выбор, правильность которого в дальнейшем проверяется тяговыми расчетами и типовыми испытаниями опытных образцов ЭПС (локомотивов).

Предварительная номинальная (продолжительная или кратковременная часовая) мощность двигателей определяется, как правило, косвенным путем по предельно возможным (пограничным) режимам работы. Для этого необходимы такие данные, как максимальный вес поезда, наибольшая возможная величина расчетного подъема, наибольшая допустимая скорость.

Мощность, сила тяги и другие параметры ЭПС (локомотива), найденные для этих предельных режимов, часто соответствуют условиям перегрузки или режиму максимальной скорости. Для перехода же к номинальным параметрам используют соотношения между этими предельными и номинальными данными, полученными при обобщении опыта эксплуатации. При этом часто приходится пользоваться предполагаемыми предварительными характеристиками двигателей, в качестве которых используют типовые или универсальные характеристики.

Универсальные характеристики:

$$[V/V_q] \% = f[I/I_q] \%, \quad [F/F_q] = f[I/I_q] \%, \quad [\eta/\eta_q] \% = f[I/I_q] \%$$

ТЭД постоянного тока последовательного возбуждения составлены на основании анализа характеристик современных отечественных и зарубежных ТЭД для режима полного поля и номинального постоянного напряжения на зажимах машины.

При определении исходных параметров ТЭД часто необходимы характеристики в виде функциональных зависимостей $F(P)$ и $V(P)$. Для ТЭД постоянного тока в первом приближении принимают мощность P пропорционально току I , т.е. используют те же универсальные характеристики.

Определение мощности тяговых двигателей последовательного возбуждения

Исходные данные, принимаемые при определении (выборе) мощности ТЭД моторного вагона, следующие:

1. Максимальная (конструкционная) скорость V_k . Для моторных вагонов электропоездов пригородного сообщения $V_k=130$ км/ч, метрополитена $V_k=85\dots100$ км/ч, трамвая $V_k=65$ км/ч, троллейбуса $V_k=70$ км/ч.
2. Скорость завершения пуска или скорость выхода на естественную (автоматическую) характеристику V_m в отношении к конструкционной скорости V_k . Для моторных вагонов с ТЭД постоянного тока $V_m/V_k = 0,33\dots0,40$, метрополитена $V_m/V_k = 0,38\dots0,42$.
3. Ходовая или средняя скорость V_k на эквивалентном перегоне длиной $\ell_{\text{э}}$ и подъемом $i_{\text{э}}$. При определении параметров ТЭД устанавливаются соотношения между скоростями V_x, V_k и V_k , определяемые кроме $\ell_{\text{э}}$ и $i_{\text{э}}$, значениями пускового ускорения a_n и тормозного замедления a_T , которые для каждого типа поезда изменяются мало. Поэтому на рис.13 даны соотношения между скоростями в зависимости только от длины эквивалентного перегона.
4. Пусковые ускорения a_n и тормозные замедления a_T . Если наряду с моторными вагонами общим весом $\sum G_M$ (брутто) в состав поезда входят прицепные вагоны общим весом $\sum G_{\Pi}$, то пусковое ускорение

$$a_n = \left[\frac{\sum G_M}{\sum G_M + \sum G_{\Pi}} \right] \cdot 1,1, \quad \text{м / с}^2.$$

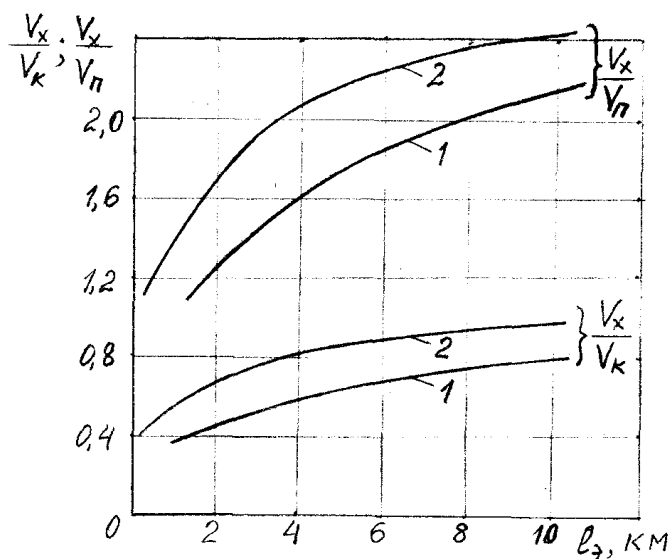


Рис.13 – Зависимости $V_x/V_n = f(l_3)$ и $V_x/V_k = f(l_3)$:

1 - для пригородных поездов, 2 - для поездов метрополитена

5. Основное удельное сопротивление движению при следовании под током w_0 и без тока w_{0X} в зависимости от скорости.

6. Коэффициент сцепления ψ , приближенно принимаемый постоянным и равным для поездов пригородного сообщения 0,21...0,22, метрополитена – 0,18. При более точных расчетах учитывают зависимость коэффициента сцепления от скорости (табл.12).

Таблица 12 – Зависимость коэффициента сцепления от скорости

V, км/ч	0	10	20	35	50	65	80	100	120
ψ	0,3	0,246	0,226	0,21	0,197	0,187	0,178	0,165	0,152

Для поездов метрополитена значения ψ из табл.12 уменьшаются на 12...15%.

7. Коэффициент инерции вращающихся частей $(1 + \gamma)$, принимаемый равным для моторных вагонов 1,10...1,15, прицепных – 1,04...1,05.

8. Коэффициент вентилированности тяговых двигателей $K_B = P_\infty / P_\chi$, принимаемый равным для мотор-вагонных двигателей с самовентиляцией 0,75...0,80, с независимой вентиляцией – 0,85...0,90.

Выбрав все необходимые исходные данные, следует переходить к определению мощности двигателей.

1. Определение мощности по пусковой скорости и порожнему весу

Если все оси вагона моторные, то при заданном весе пустого вагона G_M в кН и числе двигателей Z_M максимальная сила тяги по условиям сцепления

$$F_{k \max} = F_{cy} = \psi G_M / Z_M, \text{ кН},$$

где ψ определяется для скорости V_Π .

Предполагая неравномерность пуска в пределах $\pm 15\%$, находят пусковую мощность тягового двигателя

$$P_{K\Pi} = 0,85 F_{cy} V_\Pi / 3,6, \text{ кВт}.$$

Часовую мощность двигателя определяют по коэффициенту эксплуатационной перегрузки $K_{нэ} = P_n / P_{ном}$ равному для электропоездов без электрического торможения 1,6...1,7, с электрическим торможением – 1,5...1,6:

$$P_\chi = P_{ном} = P_\Pi / K_{нэ}.$$

Для вагонов метрополитена рассмотренный способ определения мощности двигателей отличается только тем, что в расчет принимается вес вагона с пассажирами при среднем заполнении.

Выбранный коэффициент перегрузки $K_{нэ}$ позволит перейти от V_Π к V_χ и V_K , для чего определяют соотношения между этими величинами по универсальным характеристикам двигателей.

2. Определение мощности по ходовой скорости V_X на эквивалентном перегоне

В этом случае, кроме веса вагона G_M , задается перегон длиной ℓ_ρ с подъемом i_ρ и ходовая (средняя по перегону) скорость V_X . Пусковую скорость V_Π находят по графику (см. рис.13) зависимости $V_X / V_\Pi = f(\ell_\rho)$. Затем опре-

деляют $F_{сц}$ и пусковую мощность двигателя $P_{кп}$, а далее расчет аналогичен предыдущему случаю. Этот способ определения мощности дает наиболее точные результаты для составов метрополитена, формируемых только из моторных вагонов.

3. Определение мощности по пусковому ускорению

В этом случае задаются: среднее пусковое ускорение a_n , вес секции или поезда $Q_{п}$ (брутто), число тяговых двигателей Z_m и пусковая скорость $V_{п}$. Если требуемое ускорение необходимо обеспечить на расчетном подъеме i_p (непреодолимый за счет сил инерции и на котором предполагается движение с установившейся скоростью), тогда его величина также должно быть задана.

Удельное ускоряющее усилие определяется уравнением

$$f_y = 102 \cdot (1 + \gamma) a_n, \text{ Н/кН.}$$

При скорости $V_{п}$ пусковую силу тяги каждого двигателя $F_{кп}$ определяют по уравнению

$$F_{кп} = \frac{Q_{п}}{Z_m} (f_y + w_0 + i_p), \text{ Н,}$$

где $Q_{п}$ - вес поезда, кН;

Z_m - число тяговых двигателей.

Затем пусковую силу тяги $F_{кп}$ проверяют по сцеплению. Удельное сопротивление движению w_0 принимают для скорости $V_{п}$. Затем выбирают значение коэффициента перегрузки $K_{нэ}$ и определяют часовую (номинальную) мощность двигателя

$$P_{ч} = F_{кп} V_{п} / (3,6 \cdot 10^3 K_{нэ}) \text{ кВт.}$$

4. Определение мощности по расходу энергии

Этот способ основан на использовании уравнения расхода энергии для движения поезда на эквивалентном перегоне. Исходные данные: вес поезда (брутто) $Q_{п}$, длина эквивалентного перегона $\ell_{э}$ и его подъем $i_{э}$, ходовая ско-

рость V_X или время хода по перегону t_X , число тяговых двигателей в поезде Z_M .

Сущность метода состоит в следующем:

1. Рассчитывается расход энергии на движение поезда по эквивалентному перегону, кВт·ч,

$$A = \left[(w_{cp} + i_{\vartheta})(l_{\vartheta} - l_T) + w_{cp.n} l_n + 3,93(1 + \gamma)(V_T^2 + K_n V_n^2) \right] \frac{Q_{\Pi}}{\eta_{cp} \cdot 3,6 \cdot 10^6},$$

где l_n, l_{ϑ}, l_T , - пусковой, эквивалентный и тормозной путь, м;

w_{cp} - среднее удельное сопротивление движению на пути $l_{\vartheta} - l_T$, Н/кН;

$w_{cp.n}$ - то же на пути l_n ;

$1 + \gamma = K_u$ - коэффициент инерции вращающихся частей;

i_{ϑ} - эквивалентный подъем, ‰;

V_{Π}, V_T - скорости окончания пуска и начала торможения, км/ч;

Q_{Π} - вес поезда, кН;

η_{cp} - средний КПД за периоды работы двигателей под током;

K_n - коэффициент пуска.

2. Определяется средний ток двигателя за время работы под током, А,

$$I_{cp} = \frac{A \cdot 3,6 \cdot 10^6}{Z_M t_I U_{\Delta}},$$

где t_I - время работы под током, с;

U_{Δ} - напряжение на двигателе, В;

Z_M - число тяговых двигателей.

3. От среднего тока переходят к среднеквадратичному

$$I_{cp.kв} = K_{\varphi} I_{cp},$$

где K_{φ} - коэффициент формы кривой тока, выбираемый в пределах 1,03÷1,15.

При электрическом торможении время работы тяговых двигателей под током увеличивается и составляет

$$t_{IT} = t_I + t_T.$$

Полное время, отнесенное к эквивалентному перегону,

$$t_K = t_x + t_0, c,$$

где t_0 - время остановки (15...20 с).

4. $I_{cp.kв}$, найденный для времени t_I , распространяют на период t_{IT} , и переходят к среднеквадратичному длительному току двигателя I_K , отнесенному ко времени t_K , пользуясь соотношением

$$I_K^2 t_K = I_{cp.kв}^2 t_{IT} = K_{эф}^2 I_{cp}^2 t_{IT},$$

откуда

$$I_K = K_{эф} I_{cp} \sqrt{t_{IT} / t_K}.$$

5. Определяют часовой ток двигателя

$$I_{\text{ч}} = \frac{K_{\text{зн}}}{K_B} I_K,$$

где $K_{\text{зн}} = 1,05$ – коэффициент запаса, компенсирующий возможные неточности расчетов;

K_B - коэффициент вентилированности тяговых двигателей, равный 0,75.

6. Определяют часовую мощность тяговых двигателей

$$P_{\text{ч}} = I_{\text{ч}} U_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{ср}} 10^{-3}, \text{кВт}.$$

При отсутствии электрического торможения принимают $t_{IT} = t_I$.

Значения $V_T, \ell_n, \ell_T, t_I, t_{IT}$ определяют по кривой движения $V(t)$ для заданного перегона, которую строят на основании выбранных значений a_n и a_T .

5. Определение мощности тяговых двигателей по удельным нормам

Предварительно мощность тяговых двигателей определяют по удельным величинам, т.е. по мощности, отнесенной к единице веса поезда.

Нормы удельной мощности первоначально определяют по каким-либо ограничивающим условиям, например: по сцеплению, максимальной скорости, ускорению или же берут по данным действующего электроподвижного состава.

Определение норм удельной мощности для электропоездов метрополитена.

Нормы удельной мощности тяговых двигателей можно рассчитывать по пусковым ускорениям. Как известно, полная удельная сила тяги на горизонтальном пути

$$f_n = f_v + w_0, \text{ Н/кН},$$

где f_v удельная ускоряющая сила (динамическая сила) в процессе пуска

$$f_v = 102(1 + \gamma)a_n, \text{ Н/кН}.$$

При скорости окончания пуска V_{Π} удельная мощность

$$P_{\Pi} = \frac{f_{\Pi} V_{\Pi}}{3,6 \cdot 10^3}, \text{ кВт/кН},$$

где V_{Π} - скорость окончания пуска в км/ч.

После замены f_{Π} через f_v и w_0

$$P_{\Pi} = \frac{102(1 + \gamma)a_{\Pi} + w_0}{3,6 \cdot 10^3} V_{\Pi}, \text{ кВт/кН}. \quad (32)$$

Для перехода к зависимости $P_q(V_q)$ необходимо выбрать коэффициенты эксплуатационной перегрузки $K_{\Pi\Delta}$ и пусковой скорости K_{Vn} по соотношениям: $K_{\Pi\Delta} = P_{\Pi} / P_{ном}$, $K_{Vn} = V_{\Pi} / V_{ном}$.

Заменив в уравнении (32) P_{Π} и V_{Π} через $K_{\Pi\Delta} P_q$ и $K_{Vn} V_q$, получим

$$P_q = \frac{K_{Vn}}{K_{\Pi\Delta}} \cdot \frac{102(1 + \gamma)a_n + w_0}{3,6 \cdot 10^3} V_q, \text{ кВт/кН}.$$

Задаваясь значениями V_q , можно построить зависимость $P_q(V_q)$, предварительно выбрав величины коэффициентов, входящих в уравнение. При этом основное удельное сопротивление движению w_0 принимают для скорости $V_{II} = K_{vn} V_q$. Зависимость $P_q(V_q)$ весьма близка к прямолинейной, поэтому полученное уравнение можно заменить простыми выражениями.

Если принять $a_{II} = 1,1 \text{ м/с}^2$, $\gamma = 0,15$, а значение w_0 взять по кривой для поездов метрополитена ($w_0 = 3,5 \text{ Н/кН}$)

$$P_q = (K_{vn}/K_{II}) \cdot 0,0368 V_q \text{ кВт/кН},$$

или принимая по характеристике полного поля $K_{II} = 1,4$ и $K_{vn} = 0,85$,

$$P_q = 0,0223 V_q \text{ кВт/кН}.$$

9. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНЫМ ЗАНЯТИЯМ

К выполнению контрольных заданий следует приступить только после изучения и усвоения соответствующего теоретического материала.

Контрольные задания следует выполнять в ученической тетради или на стандартных листах бумаги, хорошо сброшюрованных и вложенных в обложку. На обложке или титульном листе указать название контрольного задания, номер варианта, фамилию и инициалы исполнителя, номер учебной группы.

Решение каждой задачи должно содержать ее формулировку, полные расчеты и необходимые краткие пояснения к ним. Решение следует выполнять в общем виде и в полученные конечные (расчетные) формулы подставлять количественные значения всех величин, после чего необходимо написать результат расчета и указать единицу его измерения.

Все записи следует выполнять аккуратно, четким почерком, без применения чернил или пасты красного цвета.

Контрольное задание №1

Студент выполняет тот вариант контрольных задания, который совпадает с последней цифрой его учебного шифра. Номера задач для соответствующего варианта приведены в табл. 13.

Таблица 13 – Варианты контрольного задания

Номер варианта	Номера задач контрольных заданий							
1	1	6	16	26	31	35	41	47
2	2	7	17	27	32	36	42	48
3	3	8	18	28	33	37	43	45
4	4	9	19	29	34	38	44	46
5	5	10	20	30	31	39	45	47
6	1	11	21	26	32	40	46	48
7	2	12	22	27	33	37	47	10
8	3	13	23	28	34	38	48	17
9	4	4	24	29	31	39	49	45
0	5	15	25	30	33	40	50	48

Тексты задач к контрольным заданиям приведены ниже. В конце текста каждой задачи указан порядковый номер рекомендованной литературы, главы и параграфы этой литературы, изучение которых позволит решить задачу.

Задачи контрольного задания №1

Задача 1. Определить коэффициент инерции K_u , приведенную массу $m_{пр}$ и эквивалентную массу $m_э$ вращающихся частей троллейбуса ЗИУ-9, имеющего физическую массу $m=9,5$ т и движущегося под действием ускоряющей силы $F_y=11$ кН с ускорением $a=1$ м/с².

[1],гл. 1; [3], §1; [4], §1.1

Задача 2. Определить приведенную массу $m_{пр}$, физическую массу m , вес G и коэффициент инерции вращающихся частей K_u моторного трамвайного вагона, имеющего эквивалентную массу вращающихся частей $m_э = 2,5$ т и движущегося под действием ускоряющей силы $F_y = 30$ кН с ускорением $a = 1,2$ м/с².

[1],гл. 1; [3], §1; [4], §1.1

Задача 3. Определить коэффициент инерции K_u и эквивалентную массу $m_э$ вращающихся частей трамвайного поезда, состоящего из моторного вагона массой $m_m = 16$ т и двух прицепных вагонов, каждый из которых имеет массу $m_{п} = 10$ т. Коэффициент инерции вращающихся частей моторного и прицепных вагонов принять соответственно равными 1,12 и 1,08.

[1],гл. 1; [3], §1; [4], §1.1

Задача 4. Определить коэффициент инерции вращающихся частей прицепного четырехосного вагона, если его масса $m = 14$ т, а масса одной колесной пары $m_в = 0,45$ т. Среднее значение отношения радиуса инерции колесной пары к радиусу колес принять равным $\rho_в/R_в = 0,75$.

[1],гл. 1; [3], §1; [4], §1.1

Задача 5. Определить передаточное число редуктора моторного трамвайного вагона, если его физическая масса $m = 28$ т, коэффициент инерции вращающихся частей $K_u = 1 + u = 1,14$, масса одной колесной пары $m_к = 0,45$ т, масса якоря тягового двигателя и связанных с ним элементов редуктора $m_я = 0,1$ т, среднее значение отношений радиусов инерции колесной пары $\rho_к$ и якоря $\rho_я$ к радиусу колес $K.к$ соответственно равны: $\rho_к/R_к = 0,75$, $\rho_я/R_к = 0,4$.

[1],гл. 1; [3], §1; [4], §1.1

Задача 6. Определить наибольшую силу тяги трамвайного вагона типа КТМ-5М с пассажирами и без пассажиров, реализуемую без боксования колес. Масса тары вагона $m_в = 18$ т, вместимость 140 человек, средняя масса пассажира 75 кг. Коэффициент сцепления $\psi = 0,16$.

[1],гл. 2; [3], §2; [4], §2.1

Задача 7. Определить наибольшую силу тяги троллейбуса типа ЗиУ-9 с пассажирами и без пассажиров, реализуемую без боксования колес. Масса тары троллейбуса ЗиУ-9 $m_b=9,5\text{т}$, вместимость 125 человек, средняя масса пассажира 75 кг, коэффициент сцепления $\psi =0,35$.

[1],гл. 2; [3], §2; [4], §2.1

Задача 8. Определить наибольшую допустимую по сцеплению тормозную силу трамвайного вагона типа КТМ-5М с пассажирами и без пассажиров.

Масса тары вагона $m_b=18\text{т}$, вместимость 140 человек, средняя масса пассажира 75 кг, коэффициент сцепления $\psi = 0,16$.

[1],гл. 2; [3], §2 [4], §2.1

Задача 9. Определить наибольшую допустимую по сцеплению тормозную силу троллейбуса ЗиУ-9 с пассажирами и без пассажиров. Масса тары троллейбуса $m_b =9,5\text{т}$, вместимость 125 человек, средняя масса пассажира 75 кг, коэффициент сцепления $\psi =0.35$.

[1],гл. 2; [3], §2 [4], §2.1

Задача 10. Определить мощность механических потерь в тяговых двигателях и механических передачах (редукторах) моторного трамвайного вагона типа КТМ-5М имеющего массу $m_b=28\text{т}$ идвигающегося со скоростью $\psi =30\text{км/ч}$.

[1],гл. 3; [3], §3;[4], §3.1

Задача 11. Определить тормозную силу B , при которой моторный трамвайный вагон типа КТМ-5М массой $m=25\text{т}$ на спуске с уклоном $i = - 50 \%$ будет двигаться с наибольшей допустимой скоростью $V_{\max} =25 \text{ км/ч}$.

[1],гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1, 3.2, 3.3

Задача 12. Определить, на спуске какой крутизны трамвайный вагон массой $m=25,5\text{т}$ будет двигаться с постоянной скоростью, если сумма тормозной силы и силы основного сопротивления движению $B+W_o=10\text{кН}$.

[1],гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 13. Определить, на спуске какой крутизны моторный трамвайный вагон типа КТМ-5М массой 25т будет двигаться с постоянной скоростью $V=15$ км/ч, если тормозная сила $B=20$ кН

[1],гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 14. Определить дополнительное сопротивление движению $W_{\text{доп}}$ трамвайного вагона типа КТМ-5М массой 24т при движении на криволинейном спуске с уклоном $i = -10\%$ и радиусом кривизны $R_{\text{кр}} = 150$ м.

[1],гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 15. Для троллейбуса типа ЗиУ-9 массой 15т определить сопротивление движению от уклона длиной 500м с высотами в начале и в конце соответственно $h_{\text{н}}=2$ м и $h_{\text{к}}=12$ м. Определить также увеличение потенциальной энергии поезда в конце подъема.

[1],гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 16. Определить полное сопротивление движению для трамвайного вагона типа КТМ-5М массой 25т при движении в режиме тяги на криволинейном подъеме с уклоном $i=20\%$ и радиусом кривизны $R_{\text{кр}}=150$ м со скоростью $V=20$ км/ч.

[1],гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 17. Определить мощность механических потерь в тяговом двигателе и механической передаче троллейбуса типа ЗиУ-9 при скорости движения $V=30$ км/ч. Масса троллейбуса $m=15$ т.

[1],гл. 1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 18. Определить установившуюся скорость движения моторного трамвайного вагона типа КТМ-5М в режиме выбега на прямолинейном спуске с уклоном $i= -13 \%$.

[1],гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 19. Определить установившуюся скорость движения троллейбуса типа ЗиУ-9 в режиме выбега на спуске с уклоном $i= -19\%$

[1],гл. 1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 20. Определить установившуюся скорость движения моторного трамвайного вагона типа КТМ-5М в режиме выбега на криволинейном спуске с уклоном $i = -20\%$ и радиусом кривизны $R_{кр} = 450\text{м}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 21. Определить полное сопротивление движению для троллейбуса ЗиУ-9 массой 15т при движении в режиме тяги на подъеме с уклоном $i = 10\%$ со скоростью $V = 30\text{ км/ч}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 22. Определить удельную силу электрического торможения, при которой трамвайный вагон типа КТМ-5М при движении на криволинейном спуске с уклоном $i = -20\%$ радиусом кривизны $R_{кр} = 75\text{м}$ не превысит максимально допустимую скорость $V_{\text{max.кр}} = 20\text{ км/ч}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 23. Определить пусковую силу тяги $F_{п}$ трамвайного вагона типа КТМ-5М и троллейбуса типа ЗиУ-9 в момент трогания ($V = 0$) на прямолинейном подъеме с уклоном $i = 2\%$, если пусковое ускорение $a_{п} = 0,4\text{ м/с}^2$. Вес трамвая 250кН, приведенная масса 28,6т. Вес троллейбуса 180 кН, приведенная масса 21 т.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 24. Определить ускорение трамвайного вагона типа КТМ-5М и троллейбуса типа ЗиУ-9 на прямом и горизонтальном участке пути, если при скорости $V = 50\text{ км/ч}$ сила тяги $F = 5000\text{Н}$. Вес трамвая $G = 250\text{кН}$, приведенная масса $m_{п} = 28,6\text{т}$. Вес троллейбуса $G = 150\text{кН}$, приведенная масса $m_{п} = 17,5\text{т}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 25. Определить величину ускорения трамвайного вагона типа КТМ-5М в момент трогания ($V = 0$) на криволинейном спуске с уклоном $i = -2\%$ и радиусом кривизны $R_{кр} = 90\text{м}$, если пусковая сила тяги $F_{п} = 10\text{кН}$. Вес трамвая $G = 250\text{ кН}$, приведенная масса $m_{п} = 28,6\text{ т}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 26. Определить, при каком значении коэффициента сцепления ψ будет невозможна реализация тормозной силы $B=29\text{кН}$, развиваемой при электрическом торможении трамвайного вагона весом $G=235\text{кН}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 27. При механическом торможении на прямолинейном спуске с уклоном $i = -39,5\%$ трамвайный вагон типа КТМ-5М движется с установившейся скоростью $V_y=10\text{км/ч}$. Определить величину тормозной силы вагона, если его вес $G=235\text{кН}$.

[1], гл. 1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 28. Определить, возможно ли остановить трамвайный вагон типа КТМ-5М на прямолинейном пуске с уклоном $i = -100\%$, если тормозная сила вагона $B=20\text{кН}$, скорость начала торможения $V_T=30\text{км/ч}$. Вес вагона $G=240\text{кН}$, коэффициент инерции вращающихся частей вагона $1+\gamma=1,12$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 29. Определить пусковую силу тяги $F_{\text{п}}$ трамвайного вагона типа КТМ-5М и троллейбуса типа ЗиУ-9 в момент трогания с места ($V=0$) на прямолинейном спуске с уклоном $i = -2\%$, если начальное значение пускового ускорения $a_{\text{нач}}=0,3 \text{ м/с}^2$. Вес трамвая 220кН , троллейбуса - 150кН , коэффициент инерции вращающихся частей трамвая и троллейбуса $1+\gamma=1,12$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 30. Определить величину тормозного замедления a_t в момент начала механического торможения трамвайного вагона типа КТМ-5М на прямолинейном спуске с уклоном $i = -5\%$, если тормозная сила $B=20\text{кН}$, вес вагона $G=235\text{кН}$, коэффициент инерции вращающихся частей вагона $1+\gamma=1,12$, скорость начала торможения $V_T=30\text{км/ч}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3

Задача 31. Определить величину допустимого по сцеплению максимального прямолинейного подъема, который может преодолеть трамвайный

вагон типа КТМ-5М со скоростью $V=30$ км/ч, при коэффициенте сцепления колес с рельсами $\psi=0,16$

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22

Задача 32. Определить величину допустимого по сцеплению максимального прямолинейного подъема, на котором возможно трогание с места ($V=0$) трамвайного вагона типа КТМ-5М с ускорением $a_{\text{нач}}=0,4$ м/с², если коэффициент сцепления колес с рельсами $\psi=0,16$ коэффициент инерции вращающихся частей вагона $1+\gamma=1,14$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22

Задача 33. Определить величину допустимого по сцеплению максимального подъема, который может преодолеть троллейбус типа ЗиУ-9 со скоростью 30 км/ч при коэффициенте сцепления колес с дорожным покрытием $\psi=0,35$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22

Задача 34. Определить величину допустимого по сцеплению максимального подъема, на котором возможно трогание с места ($V=0$) троллейбуса типа ЗиУ-9 с ускорением $a_{\text{нач}}=0,3$ м/с², если коэффициент сцепления колес с дорожным покрытием $\psi=0,35$, коэффициент инерции вращающихся частей троллейбуса $1+\gamma=1,15$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22

Задача 35. Определить величину замедления a_t и тормозной путь L_t трамвайного вагона типа КТМ-5М при экстренном торможении рельсовым тормозом на прямом и горизонтальном участках пути. Скорость начала торможения $V_t=30$ км/ч, вес вагона $G=250$ кН, коэффициент инерции вращающихся частей вагона $1+\gamma=1,12$, среднее значение коэффициента трения тормозного башмака о рельс $\phi_p=0,14$, площадь соприкосновения с рельсом одного полюсного башмака $S=0,2$ м², магнитная индукция в зазоре между башмаком и рельсом $B\delta=1,2$ Тл.

[1], гл. 1,3,4; [3], §1,3,8; [4], §1.1, 3.1 - 3.3,4.4.

Задача 36. Определить величину замедления a_t трамвайного вагона типа КТМ-5М в начальный момент экстренного торможения рельсовым тормозом на прямом и горизонтальном участках пути. Скорость начала торможения $V_t = 50 \text{ км/ч}$, вес вагона $G = 230 \text{ кН}$, коэффициент инерции вращающихся частей $1 + \gamma = 1,12$, площадь соприкосновения одного полюсного башмака с рельсом $S = 0,18 \text{ м}^2$, магнитная индукция в зазоре между башмаком и рельсом $B\delta = 1,3 \text{ Тл}$, коэффициент трения тормозного башмака о рельс определяется из выражения

$$\varphi_p = 0,19 \frac{10,8 \cdot V + 100}{21,6 \cdot V + 100}$$

[1], гл. 1,3,4; [3], §1,3,8; [4], §1.1, 3.1 - 3.3,4.4.

Задача 37. Определить величину допустимого по сцеплению максимального прямолинейного спуска, на котором можно затормозить трамвайный вагон типа КТМ-5М при электрическом торможении с замедлением 1 м/с^2 , если коэффициент сцепления колес с рельсами $\psi = 0,15$, коэффициент инерции вращающихся частей вагона $1 + \gamma = 1,12$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22

Задача 38. Определить величину допустимого максимального криволинейного спуска, на котором трамвайный вагон типа КТМ-5М в режиме электрического торможения будет двигаться равномерно со скоростью $V = 10 \text{ км/ч}$, если коэффициент сцепления колес с рельсами $\psi = 0,15$, коэффициент инерции вращающихся частей вагона $1 + \gamma = 1,12$, радиус кривизны спуска $R_{кр} = 150 \text{ м}$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22

Задача 39. Определить величину допустимого по сцеплению максимального спуска на котором троллейбус типа ЗиУ-9 будет двигаться при электрическом торможении с замедлением 1 м/с^2 , если коэффициент сцепления колес с полотном дороги $\psi = 0,35$, коэффициент инерции вращающихся частей $1 + \gamma = 1,12$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22

Задача 40. Определить величину допустимого по сцеплению максимального спуска, на котором троллейбус типа ЗиУ-9 в режиме электрического

торможения будет двигаться равномерно со скоростью $V=10$ км/ч, если коэффициент сцепления колес с дорожным покрытием $\psi = 0,35$, коэффициент инерции вращающихся частей $1 + \gamma = 1,12$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22

Задача 41. Определить наибольшую допустимую по сцеплению силу нажатия на одну тормозную колодку барабанного тормоза троллейбуса, если коэффициент нажатия тормозных колодок $\delta=2$, диаметр тормозного барабана $D_б=400$ мм, диаметр движущего колеса $D_к=1070$ мм, вес троллейбуса $G=150$ кН.

[1], гл. 8; [3], §8; [4], §4.2; [6], §6.2

Задача 42. Определить тормозную силу B , создаваемую тяговым двигателем последовательного возбуждения при реостатном торможении, если при токе якоря $I_T=200$ А и скорости $V=20$ км/ч электродвижущая сила якоря $E=600$ В. Суммарные магнитные и механические потери в двигателе и передаче

$$\Delta P_T = (\Delta P_M + \Delta P_{MX} + \Delta P_3) = 4 \text{ кВт.}$$

[1], гл. 4,9; [3], §4,9; [4], §5.1, 6.2, 6.3

Задача 43. Определить равнодействующую (суммарную) тормозную силу троллейбуса ЗиУ-9 массой $m=15$ т, если при движении на спуске с уклоном $i=-20\%$ при скорости $V=30$ км/ч ток якоря двигателя ДК-211 А работающего в режиме реостатного торможения, $I_T=350$ А, ЭДС $E=800$ В, суммарные магнитные и механические потери в двигателе и передаче

$$\Delta P_T = (\Delta P_M + \Delta P_{MX} + \Delta P_3) = 5 \text{ кВт.}$$

[1], гл. 4,9; [3], §4,9; [4], §5.1, 6.2, 6.3

Задача 44. Определить наибольшую допустимую по сцеплению силу нажатия K_{max} на одну тормозную колодку барабанного тормоза трамвайного вагона типа КТМ-5М, если коэффициент нажатия тормозных колодок $\delta = 0,6$, передаточное число редуктора $\mu = 7,143$, диаметр движущего колеса $D_к=0,7$ м, диаметр тормозного барабана $D_б=200$ мм, КПД механической передачи (редуктора) $\eta_3 = 0,96$, масса вагона $m=25$ т, число прижимаемых к тормозному барабану колодок $n=2$.

[1], гл. 8; [3], §8; [4], §4.2; [6], §6.2

Задача 45. В номинальном режиме работы ЭДС якоря тягового двигателя $E_{\text{ном}}=0,9U_{\text{ном}}$. Определить, как изменится ток якоря I и электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$ двигателя по отношению к их номинальным значениям $I_{\text{ном}}$ и $M_{\text{эм.ном}}$, если магнитный поток уменьшится до значения $\Phi=0,8\Phi_{\text{ном}}$, а частота вращения (скорость движения) останется прежней, равной номинальному значению ($n=n_{\text{ном}}=\text{const}$).

[1], гл. 5; [3], §5; [4], §5.2

Задача 46. Два тяговых двигателя ДК-261А в соответствии со своими характеристиками при $U=U_{\text{ном}}=275$ В и $I=I_{\text{ном}}=250$ А имеют частоты вращения 1430 и 1480 об/мин. Какова будет частота вращения двигателей при их последовательном включении к напряжению контактной сети $U_k=550$ В и токе нагрузки $I=I_{\text{ном}}=250$ А? В каком соотношении будут находиться их ЭДС и электромагнитные моменты (силы тяги)?

[1], гл. 6; [3], §6; [4], §5.3

Задача 47. Тяговый двигатель последовательного возбуждения ДК-211Б имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}}=150$ кВт, $U_{\text{ном}}=550$ В, $n_{\text{ном}}=1860$ об/мин, сопротивление двигателя при 115°C $r_{115^\circ}=0,12$ Ом, номинальный КПД $\eta_{\text{ном}}=91\%$.

Как изменится ток якоря двигателя I , ЭДС якоря E , полезная мощность на валу P , частота вращения n и КПД η , если напряжение сети снизится на 20%, а момент на валу двигателя останется прежним (не изменится). Изменением внутреннего момента сопротивления двигателя ΔM пренебречь.

[1], гл. 4,5; [3], §4,5; [4], §5.1, 5.2

Задача 48. Тяговый двигатель последовательного возбуждения ТЕ-022 имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}}=45$ кВт, $U_{\text{ном}}=300$ В, $n_{\text{ном}}=1750$ об/мин, сопротивление двигателя $r_{115^\circ}=0,152$ Ом, число параллельных ветвей обмотки якоря $2a=2$, число пар полюсов $p=2$, число проводников обмотки якоря $N=290$, номинальный КПД двигателя $\eta_{\text{ном}}=91\%$.

Определить ток якоря I , ЭДС якоря E , магнитный поток Φ , мощность на валу P , частоту вращения n и КПД двигателя η при понижении напряжения на 25% и неизменном моменте на валу. Изменением внутреннего момента сопротивления двигателя ΔM пренебречь.

[1], гл. 4,5; [3], §4,5; [4], §5.1, 5.2

Задача 49. Определить силу тяги P моторного трамвайного вагона, если мощность на валу тягового двигателя $P=40$ кВт, частота вращения $n=1200$ об/мин, передаточное число редуктора $\mu=7,17$, коэффициент полезного действия редуктора передачи) $\eta_3=0,96$, диаметр движущих колес $D_k=0,7$ м.

[1], гл. 1,4; [3], §1,4; [4], §1.2, 5.1

Задача 50. Заданные характеристики скорости $V(I)$ и силы тяги $F_k(I)$ двигателя, соответствующие диаметру ведущего колеса $D_k=0,7$ м и передаточному числу редуктора, $\mu=7,143$ пересчитать на диаметр ведущего колеса $D_{k1}=0,68$ м и передаточное число $\mu_1=6,71$. Характеристики $V(I)$ и $F_k(I)$ заданы в виде таблицы.

I, A	100	200	250	300
$V, \text{км/ч}$	56	33,5	28,5	26,5
F_k, H	3500	8000	10250	12500

Заданные и полученные характеристики построить в общих осях координат.

[1], гл. 1,4; [3], §1,4; [4], §1.2, 5.1

КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ №2

Рассчитать значения величин, указанных в табл. 14 вопросительным знаком, характеризующих движение троллейбуса в режиме тяги с постоянной скоростью.

В табл. 14 приняты следующие обозначения:

D - диаметр движущих и поддерживающих колес, м;

$\Delta P_{з\%} = 100\Delta P_3 / P_1$ - потери мощности в механической передаче, %;

η_d - КПД на валу тягового двигателя, о.е.;

η_3 - КПД механической передачи, о.е.;

η - КПД тягового двигателя на ободах движущих колес, о. е.;

$\mu = \omega / \omega_k$ - передаточное число механической передачи;

ω - угловая скорость вала двигателя, рад/с;

ω_k - угловая скорость движущих и поддерживающих колес, рад/с;

P_1 - подведенная к двигателю мощность, кВт;

P_2 - мощность на валу тягового двигателя, кВт;

P - мощность тягового двигателя на ободах движущих колес, кВт;

M - вращающий момент на валу тягового двигателя, Н·м;

V - поступательная скорость движения троллейбуса, км/ч;

m - масса троллейбуса, Т;

m_{np} - приведенная к скорости V масса троллейбуса, Т;

K_H - коэффициент инерции вращающихся частей троллейбуса;

$J_{я}$ - момент инерции якоря двигателя, включая части механической передачи, жестко связанные с его валом, кг·м²;

$J_{K\omega}$ - момент инерции движущих и поддерживающих колес, включая части механической передачи, жестко связанные с ними, кг·м²;

J_{np} - приведенный к угловой скорости ω вала двигателя момент инерции троллейбуса, кг·м²;

W - полное сопротивление движению троллейбуса, кН;

$w_0 = 12 + 0,004V^2$ - удельное основное сопротивление движению троллейбуса, Н/кН;

i - уклон профиля пути, ‰.

Таблица 14 – исходные данные к расчету параметров тягового электропривода и движения троллейбуса

№ варианта	$D_k, \text{ м}$	$\Delta P_3, \%$	$\eta_D, \text{ о.е.}$	$\eta_3, \text{ о.е.}$	$\eta, \text{ о.е.}$	$\mu, \text{ о.е.}$	$P_1, \text{ кВт}$	$P_2, \text{ кВт}$	$P, \text{ кВт}$	$M, \text{ Н·м}$	$V, \text{ км/ч}$	$\omega, \text{ рад/с}$	$m, \text{ т}$	$m_{np}, \text{ т}$	$K_H, \text{ о.е.}$	$J_{я}, \text{ кг·м}^2$	$J_K, \text{ кг·м}^2$	$J_{np}, \text{ кг·м}^2$	$W, \text{ кН}$	$w_o, \text{ Н/кН}$	$i, \%$
1	1,07	6	0,85	?	?	11,4	?	?	?	?	40	?	18	?	?	3,2	70	?	5	?	?
2	1,10	?	?	0,94	?	11,3	68	?	55	?	45	?	16	?	?	3,5	65	?	?	?	?
3	1,10	5	0,84	?	?	12,0	?	?	52	220	?	250	20	?	?	3,4	75	?	?	?	?
4	1,07	?	?	0,95	?	12,0	60	?	?	?	36	?	22	?	1,1	?	80	?	?	?	5
5	1,07	4,5	0,82	?	?	?	?	?	?	?	?	240	18	?	?	3,2	?	43	?	18,4	9,9
6	?	5	0,83	?	?	11,4	?	?	?	?	30	173	17	?	?	?	70	45	?	?	7
7	?	?	?	0,94	?	11,3	67	?	?	?	?	257	16	?	?	3,3	68	?	?	20,1	8
8	1,10	5	0,84	?	?	12,0	?	?	53	220	?	250	20	?	?	3,3	77	?	?	?	?
9	1,07	6	0,85	?	?	11,3	?	?	?	?	?	?	19	?	?	3,1	70	?	6	22	?
0	1,10	4,6	0,83	?	?	?	?	?	50	?	?	235	18	?	?	3,0	80	?	?	18,4	?

Пример расчета

Вариант №1

1. Результирующий КПД механической передачи тягового электропривода

$$\eta_3 = 1 - \frac{\Delta P_{3\%}}{100 \cdot \eta_d} = 1 - \frac{6}{100 \cdot 0,85} = 0,93.$$

2. КПД тягового двигателя, отнесенный к ободу движущих колес,

$$\eta = \eta_d \cdot \eta_3 = 0,85 \cdot 0,93 = 0,79.$$

3. Мощность, развиваемая ТЭД на ободу движущих колес,

$$P = F_k \cdot V / 3,6 = W \cdot V \cdot 3,6 = 5 \cdot 40 / 3,6 = 55,56 \text{ кВт}.$$

Здесь F_k - сила тяги, создаваемая тяговым двигателем, кН. При движении с постоянной скоростью сила тяги уравнивается полной силой сопротивления движению, т.е. $F_k = W$.

4. Мощность на валу тягового двигателя

$$P_2 = P / \eta_3 = 55,56 / 0,93 = 59,74 \text{ кВт}.$$

5. Подведенная к тяговому двигателю мощность

$$P_1 = P / \eta = 55,56 / 0,79 = 70,3 \text{ кВт}.$$

6. Радиус приведения кинематической схемы тягового ЭП между исполнительным органом (движущими колесами) и валом двигателя

$$\rho = \frac{V}{\omega} = \omega_k \frac{D_k}{2} \cdot \frac{1}{\omega} = \frac{D_k}{2\mu} = \frac{1,07}{2 \cdot 11,4} = 0,0469 \text{ м}.$$

7. Угловая скорость вала двигателя

$$\omega = V / \rho = 40 / (3,6 \cdot 0,0469) = 236,9 \text{ рад/с}.$$

8. Вращающий момент на валу двигателя

$$M = P_2 / \omega = 59,74 \cdot 10^3 / 236,9 = 252,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

9. Частота вращения вала двигателя

$$n = \frac{30}{\pi} \omega = \frac{30}{3,14} 236,9 = 2263 \text{ об/мин}.$$

1. Приведенная масса троллейбуса

$$m_{np} = m + m_s = m + (J_{\text{я}} \frac{\omega^2}{V^2} + J_{\text{к}} \frac{\omega_k^2}{V^2}) = m + (J_{\text{я}} \frac{\mu^2}{R_{\text{к}}^2} + J_{\text{к}} \frac{1}{R_{\text{к}}^2}) =$$

$$=18 \cdot 10^3 + (3,2 \frac{11,4^2}{0,535^2} + 70 \frac{1}{0,535^2}) = 18000 + 1454 + 245 = 19699 \text{ кг.}$$

Приведенная к поступательной скорости V масса троллейбуса определяется из равенства кинетической энергии элементов в расчетной и реальной кинематических схемах троллейбуса (рис.14).

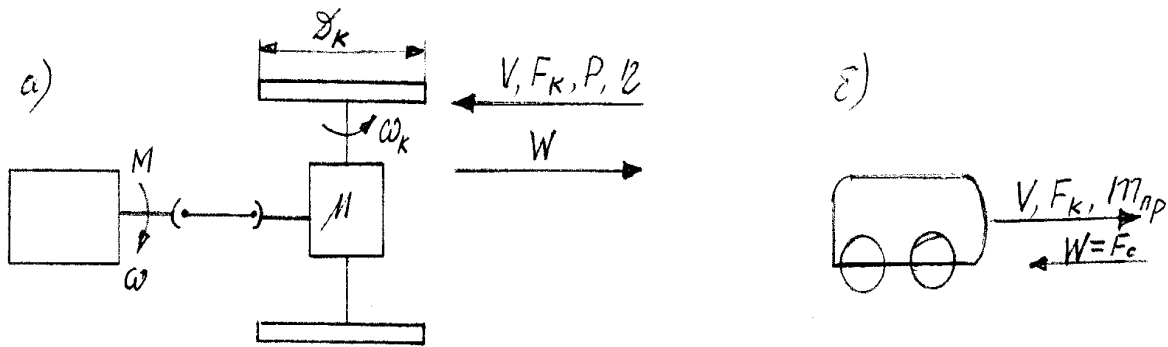


Рис. 14 – Кинематическая реальная (а) и расчетная (б) схемы троллейбуса при операции приведения к поступательной скорости движения

Троллейбус с массой m , имеющий поступательное движение с одновременным вращением некоторых его частей, эквивалентен телу с приведенной массой m_{np} , совершающему только поступательное движение:

$$m_{np} \frac{V^2}{2} = m \frac{V^2}{2} + J_{я} \frac{\omega^2}{2} + J_{к} \frac{\omega_{к}^2}{2};$$

$$m_{np} = m + m_{\omega} = m + (J_{я} \frac{\omega^2}{V^2} + J_{к} \frac{\omega_{к}^2}{V^2});$$

$$\omega = \mu \omega_{к} = \mu \frac{V}{R_{к}}; \quad R_{к} = \frac{D_{к}}{2};$$

$$m_{np} = m + m_{\omega} = m + (J_{я} \frac{\mu^2}{R_{к}^2} + J_{к} \frac{1}{R_{к}^2}).$$

2. При определении приведенного момента инерции троллейбуса J_{np} используется его расчетная схема (рис.15), представляющая собой тяговый двигатель с приведенным моментом инерции J_{np} и приведенным моментом на-

грузки $M_c = F_k V / (\eta_3 \omega) = F_k \rho / \eta_3$. Это выражение находится из уравнения баланса мощности нагрузки ЭП в реальной и расчетной схемах:

$$M_c \omega = F_k V / \eta_3 = P_2.$$

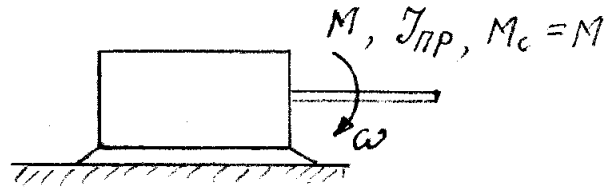


Рис. 15 – Расчетная схема троллейбуса при операции приведения движения троллейбуса к угловой скорости вала двигателя

Уравнение баланса кинетической энергии в расчетной (рис. 15) и реальной (рис.14, а) кинематических схемах имеет вид:

$$J_{пр} \frac{\omega^2}{2} = J_я \frac{\omega^2}{2} + J_к \frac{\omega_k^2}{2} + m \frac{V^2}{2}.$$

Из этого равенства находим

$$\begin{aligned} J_{пр} &= J_я + J_к \frac{\omega_k^2}{\omega^2} + m \frac{V^2}{\omega^2} = J_я + J_к / \mu^2 + m \rho^2 = \\ &= 3,2 + 70 / 11,4^2 + 18 \cdot 10^3 \cdot 0,0469^2 = 3,2 + 0,538 + 39,6 = 43,338 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \end{aligned}$$

3. Коэффициент инерции вращающихся частей троллейбуса

$$K_u = \frac{m_{пр}}{m} = \frac{19699}{18000} = 1,0944$$

или

$$K_u = \frac{J_{пр}}{J_я} = \frac{43,338}{39,6} = 1,0944,$$

где $J_я = m \rho^2$ - эквивалентный момент инерции массы поезда.

4. Основное сопротивление движению троллейбуса

$$\begin{aligned} W_0 &= m g w_0 = m g (12 + 0,004 V^2) = \\ &= 18 \cdot 9,81 (12 + 0,004 \cdot 40^2) = 18 \cdot 9,81 \cdot 18,4 = 3249 \text{ Н}. \end{aligned}$$

5. Сопротивление движению от уклона профиля пути

$$W_i = W - W_0 = 5000 - 3249 = 1751 \text{ Н.}$$

6. Уклон профиля пути

$$i = \frac{W_i}{mg} = \frac{1751}{18 \cdot 9,81} = 9,9 \text{ ‰}.$$

16. Удельное основное сопротивление движению троллейбуса при движении под током (работе двигателей) на асфальтовых и бетонных дорогах и скорости V , км/ч,

$$w_0 = 12 + 0,004 + 40^2 = 18,4 \text{ Н/кН.}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пушков П.М. Основы электрической тяги. Ч.1. Характеристики основных режимов движения поезда: Уч. пособие для студентов специальности 7.092.202 – «Электрический транспорт». – Харьков: ХГАГХ, 2001. – 187с.
2. Пушков П.М. Основы электрической тяги. Ч.2. Тяговые расчеты. Частотно-регулируемый асинхронный тяговый привод: Уч. пособие для студентов специальности 7.092.202 – «Электрический транспорт». – Харьков: ХГАГХ, 2001. – 103с.
3. Основы электрической тяги. Методические указания к практическим и самостоятельным занятиям (для студентов 3 курса дневной и 4, 5 курсов заочной форм обучения и филиалов по специальности 7.092.202 – «Электрический транспорт»). Сост.: П.М. Пушков, В.П. Андрейченко – Харьков: ХНАГХ, 2003-78с.
4. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги: Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1983.-328с.
5. Кутыловский М.П. Электрическая тяга / городской электрический транспорт /. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1970.-263с.
6. Байрыева Л.С., Шевченко В.В. Электрическая тяга: городской наземный транспорт: Учебник для техникумов. – М.: Транспорт, 1986.-206с.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение -----	3
1. Спрямление профиля участка пути-----	4
2. Расчет эквивалентного по расходу энергии уклона участка пути-----	8
3. Расчет и построение тяговой характеристики поезда-----	14
4. Определение расхода электроэнергии на движение поезда-----	23
5. Расчет и построение кривых движения-----	30
6. Тормозные задачи-----	35
7. Проверка мощности тяговых двигателей способом среднего квадратичного тока-----	55
8. Выбор мощности тяговых электрических двигателей-----	57
9. Контрольные задания к самостоятельным занятиям-----	66
Список литературы-----	84

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Методические указания

к практическим и самостоятельным занятиям по тяговым расчетам по дисциплине «Основы электрической тяги» (для студентов 3 курса дневной, 4 курса заочной форм обучения специальности 7.092202 – «Электрический транспорт»)

Составители: Павел Максимович Пушкин,
Владимир Павлович Андрейченко,
Александр Викторович Кульбашный

Редактор: Н.З. Алябьев

Корректор: З.И. Зайцева

План 2008, поз. 259-М

Подп. к печати 21.03.2008	Формат 60 x 80 1/16	Бумага офисная.
Печать на ризографе	Обл.-изд. лист. 4,2.	Усл.-печ. лист 4,7
Тираж 200 экз.	Зак. №	

61002 Харьков, ХНАГХ, ул. Революции, 12

Сектор оперативной полиграфии при ЦНИТ ХНАГХ
61002, Харьков, ХНАГХ, ул. Революции, 12